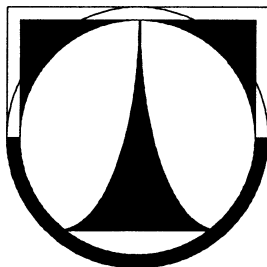


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**TESTOVÁNÍ MĚŘIDEL NA SPOTŘEBU VZDUCHU
V MOTORU PŘI LABORATORNÍCH ZKOUŠKÁCH MOTORŮ**

**The test of air consumption gauges during laboratory
engine testing**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

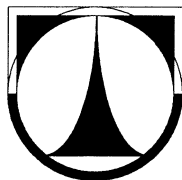
Petr Bukvička

Leden 2011

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor 2301R022

Stroje a zařízení

Zaměření

Dopravní stroje a zařízení

**TESTOVÁNÍ MĚŘIDEL NA SPOTŘEBU VZDUCHU
V MOTORU PŘI LABORATORNÍCH ZKOUŠKÁCH MOTORŮ**

**The test of air consumption gauges during laboratory
engine testing**

Bakalářská práce

KVM – BP – 227

Petr Bukvička

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Stanislav Beroun, CSc., TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce: Ing. Radek Holubec, TU v Liberci, KVM

Ing. Ľudovít László, TU v Liberci, KVM

Počet stran: 63

Počet obrázků: 48

Počet tabulek: 34

Počet grafů: 12

Počet příloh: 1

Počet výkresů: 3

Leden 2011

Testování měřidel na spotřebu vzduchu v motoru při laboratorních zkouškách motorů

Anotace

Bakalářská práce vysvětluje význam měření spotřeby vzduchu v pístovém spalovacím motoru. Podstatná část práce se zabývá porovnáváním výsledků měření průtoku vzduchu různými typy měřidel používaných v laboratoři KVM pro měření spotřeby vzduchu v motorech. Porovnávací měření byla prováděna na postavené měřicí trati při ustálených podmínkách průtoku vzduchu. Poslední část bakalářské práce ukazuje na složitost problematiky přesného měření spotřeby vzduchu v motoru.

Klíčová slova: spotřeba vzduchu, průtokoměry, porovnávací měření

The test of air consumption gauges during laboratory engine testing

Annotation

This bachelor thesis explains the importance of measuring the air consumption in a piston combustion engine. A substantial part of the work deals with comparing the results of measuring airflow with different types of gauges used in the KVM laboratory to measure air consumption in engines. Comparative measurements were carried out at a test track under steady airflow conditions. The last part of the paper shows the complexity of an accurate air consumption measurement in engines.

Key words: air consumption, flowmeters, comparative measurements

Desetinné třídění:

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

2011

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom(a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V dne

.....
podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou v první řadě poděkoval vedoucímu moji bakalářské práce prof. Ing. Stanislavu Berounovi, CSc. za vedení, cenné rady a velkou dávku trpělivosti při jejím vypracování.

Dále bych rád poděkoval Ing. Radku Holubcovi, Ing. Ľudovítu László, Ing. Martinu Mazačovi a MSc. Michalu Vojtíškov-Lom, Ph.D. za odbornou pomoc a rady při měření. Děkuji p. Josefu Andělovi za pomoc při výrobě dílů pro měřicí trať.

V poslední řadě děkuji své rodině za velkou podporu v průběhu celého studia.

Seznam symbolů a jednotek

η_P	plnicí účinnost	[-]
M_{cv}	hmotnost čerstvé náplně (vzduchu) do motoru	[kg]
M_{teor}	hmotnost teoretického množství čerstvé náplně do motoru	[kg]
\dot{m}_{cv}	hmotnostní tok čerstvé náplně do motoru	[kg.s ⁻¹]
\dot{m}_{teor}	hmotnostní tok teoretického množství náplně do motoru	[kg.s ⁻¹]
V_Z	zdvihový objem válce	[m ³]
i_v	počet válců	[-]
ρ_1	hustota vzduchu před sacím potrubím motoru	[kg.m ⁻³]
n	otáčky motoru	[min ⁻¹]
k_M	součinitel ($k_M = 1$ pro 2dobý motor, $k_M = 2$ pro 4dobý motor)	[-]
η_V	objemová (volumetrická) účinnost	[-]
V_S	skutečný spotřebovaný objem vzduchu na válec	[m ³]
M_V	hmotnostní naplnění vzduchu na válec	[kg]
$\Delta\tau_s$	časový interval	[s ⁻¹]
l_s	délka nasávacího potrubí	[m]
a_z	rychlost zvuku	[m ³ .s ⁻¹]
κ	adiabatický exponent	[-]
r_{vzd}	měrná plynová konstanta vzduchu	[J/kg. K]
T_{vzd}	teplota vzduchu	[K]
d_s	průměr pístu	[m]
z_p	zdvih pístu	[m]
D_V	průměr válce	[m]
λ	součinitel přebytku vzduchu	[-]
M_V	hmotnost suchého vzduchu ve směsi	[kg]
M_P	hmotnost paliva ve směsi	[kg]
L_{VT}	teoretické množství suchého vzduchu	[kg/kg]
f	frekvence otáčení	[s ⁻¹]
k_T	konstanta turbinového průtokoměru	[m ³]
Q	objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
s	skluz turbíny	[s ⁻¹]
Q_T	teoretický objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
Q_S	skutečný objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
p_n	normálový tlak	[Pa]
p_b	barometrický tlak	[Pa]
t_0	teplota vzduchu při měření	[°C]
S_1	průřez potrubí	[m ³]
k_P	koeficient proudění	[-]
v_s	střední rychlost průtoku vzduchu	[m.s ⁻¹]
D	průměr potrubí	[m]

v_1	rychlost průtoku vzduchu v potrubí před clonkou	[m.s ⁻¹]
S_2	průřez clonky	[m ³]
d	průměr clonky	[m]
v_2	rychlost průtoku vzduchu v clonce	[m.s ⁻¹]
S'	průřez vzduchu za clonkou	[m ³]
d'	průměr proudu vzduchu za clonkou	[m]
v_2'	rychlost průtoku vzduchu za clonkou	[m.s ⁻¹]
p_1	tlak vzduchu před clonkou	[Pa]
p_2	tlak vzduchu za clonkou	[Pa]
p_z	tlaková ztráta	[Pa]
ρ	hustota tekutiny	[kg.m ⁻³]
β	poměr průměrů (d/D)	[-]
C	součinitel průtoku	[-]
ε	expanzní součinitel	[-]
ρ_{vzd}	hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
m_s	hmotnostní průtok	[kg.s ⁻¹]
Δp	rozdíl tlaku před a za clonkou	[Pa]
Δp_1	rozdíl mezi barometrickým a tlakem před clonkou	[Pa]
v	rychlost průtoku vzduchu	[m.s ⁻¹]
v_k	kritická rychlost průtoku vzduchu	[m.s ⁻¹]
Re_D	Reynoldsovo číslo	[-]
ν	kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
μ	dynamická viskozita	[Pa.s]
v_{max}	maximální rychlost průtoku vzduchu	[m ² .s ⁻¹]
R	poloměr potrubí	[m]
φ_{vzd}	vlhkost vzduchu	[-]
p_{parc}	parciální tlak	[Pa]
Δp_2	rozdíl mezi barometrickým a tlakem za clonkou	[Pa]
Δp_4	rozdíl mezi barometrickým a statickým tlakem	[Pa]
p_3	statický tlak za průtokoměrem	[Pa]
p_0	statický tlak před clonkou	[Pa]
$V_{Z/M}$	zdvihový objem motoru	[m ³]
PC	Personal Computer (osobní počítač)	
$EŘJ$	elektronická řídící jednotka	
KVM	katedra vozidel a motorů	
MPP	měřič průtoku plynů	
PZ	předzesilovač	
Pt	platina	
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)	
$CrNi$	chromniklové	
NDR	Německá demokratická republika	
DN	vnitřní průměr	

<i>L</i>	laminární
<i>T</i>	turbulentní
<i>CD</i>	Compact Disc (kompaktní disk)
<i>VOCH</i>	vnější otáčková charakteristika
<i>ŠA</i>	Škoda Auto
<i>HTP</i>	High Torque Performance (vysoký točivý moment)

Použité symboly a označení jsou v některých případech uvedeny i v textu u konkrétních vztahů.

Obsah

1. Úvod.....	13
2. Význam průtokoměrů vzduchu v motoru	13
2.1. Specifikace lambda poměrů (bohatosti směsi)	14
2.2. Měření průtoku vzduchu do motoru	15
3. Použité průtokoměry plynů při měření	16
3.1. Turbinový průtokoměr diskový.....	16
3.1.1. Technická data	16
3.1.2. Popis průtokoměru	16
3.1.3. Instalace průtokoměru	17
3.1.4. Výpočtové vztahy	18
3.2. Hmotnostní průtokoměr	18
3.2.1. Technická data	18
3.2.2. Popis průtokoměrů	18
3.2.3. Instalace průtokoměrů	19
3.2.4. Výpočtové vztahy	19
3.3. Rotační plynoměr	19
3.3.1. Technická data	19
3.3.2. Popis průtokoměru	19
3.4. Průřezové měřidlo - clonka A (s koutovými odběry)	20
3.4.1. Popis průtokoměru	20
3.4.2. Popis výpočtových vztahů	21
3.4.3. Instalace clonky.....	22
3.4.4. Výpočtové vztahy určené k clonce A v laboratoři KVM	22
3.5. Průřezové měřidlo - Clonka B (čelní)	22
3.5.1. Popis průtokoměru	22
3.5.2. Výpočtové vztahy	23
3.5.3. Instalace clonky.....	23
3.5.4. Výpočtový vztah určený k clonce B v laboratoři KVM	23
3.6. Průřezové měřidlo - Laminární průtokoměr	24
3.6.1. Technická data	24
3.6.2. Popis průtokoměru	24
3.6.3. Proudění vzduchu v kanálcích.....	24
3.6.4. Výpočtové vztahy určené k laminárnímu průtokoměru	26
3.7. Průřezové měřidlo - Venturiho dýza	26
3.7.1. Technická data	26
3.7.2. Popis průtokoměru	26
3.7.3. Výpočtové vztahy	26

4. Porovnávací měření v laboratoři.....	26
4.1. Měřicí trať pro 1. sérii porovnávacích testů	28
4.1.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	28
4.1.2. Atmosférické podmínky při měření	29
4.1.3. Průběh měření	29
4.1.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	29
4.1.5. Zhodnocení	31
4.2. Měřicí trať pro 2. sérii porovnávacích testů	31
4.2.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	31
4.2.2. Atmosférické podmínky při měření	32
4.2.3. Průběh měření.	32
4.2.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	32
4.2.5. Zhodnocení	33
4.3. Měřicí trať pro 3. sérii porovnávacích testů	33
4.3.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	33
4.3.2. Atmosférické podmínky při měření	34
4.3.3. Průběh měření.	34
4.3.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	34
4.3.5. Zhodnocení	35
4.3.6. Hledání příčiny odchylky	36
4.3.7. Výpočet průtoků podle vlastních podkladů	36
4.3.8. Zhodnocení	37
4.4. Měřicí trať pro 4. sérii porovnávacích testů	38
4.4.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	38
4.4.2. Atmosférické podmínky při měření	38
4.4.3. Průběh měření.	39
4.4.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	39
4.4.5. Zhodnocení	40
4.5. Měřicí trať pro 5. sérii porovnávacích testů	40
4.5.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	40
4.5.2. Atmosférické podmínky při měření	41
4.5.3. Průběh měření.	41
4.5.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	41
4.5.5. hodnocení	42
4.6. Měřicí trať pro 6. sérii porovnávacích testů	43
4.6.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	43
4.6.2. Atmosférické podmínky při měření	44
4.6.3. Průběh měření.	44
4.6.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	44
4.6.5. Zhodnocení	45

4.7. Měřicí trať pro 7. sérii porovnávacích testů	46
4.7.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	46
4.7.2. Atmosférické podmínky při měření	47
4.7.3. Průběh měření.	47
4.7.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	47
4.7.5. Zhodnocení	48
4.8. Měřicí trať pro 8. sérii porovnávacích testů	49
4.8.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	49
4.8.2. Atmosférické podmínky při měření	50
4.8.3. Průběh měření.	50
4.8.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	50
4.8.5. Zhodnocení	51
4.9. Měřicí trať pro 9. sérii porovnávacích testů	52
4.9.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	52
4.9.2. Atmosférické podmínky při měření	53
4.9.3. Průběh měření.	53
4.9.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	53
4.9.5. Zhodnocení	54
4.10. Měřicí trať pro 10. sérii porovnávacích testů	55
4.10.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry	55
4.10.2. Atmosférické podmínky při měření	56
4.10.3. Průběh měření.	56
4.10.4. Výpočty průtoků a výsledek měření	56
4.10.5. Zhodnocení	57
4.11. Celkové zhodnocení přesnosti průtokoměrů při ustáleném proudění vzduchu	58
 5. Porovnávací zkoušky průtokoměru na motoru.....	58
5.1. Výsledek měření a přepočet na dopravní účinnost motoru	59
5.2. Zhodnocení	61
 6. Závěr	61
 Seznam použité literatury a softwaru.....	62
Seznam příloh	63

1. Úvod

Atmosférický vzduch je hlavní složkou pracovní náplně válce pístových spalovacích motorů. Hmotnost vzduchové náplně ve válci motoru určuje, jaký výkon může motor dosáhnout. Měření spotřeby vzduchu v motoru (resp. průtoku vzduchu do motoru) je důležité i z hlediska seřízení bohatosti spalované směsi, protože ovlivňuje emisní vlastnosti motoru. K měření spotřeby vzduchu v motoru se používají průtokoměry různých konstrukcí a typů. Bakalářská práce porovnává průtokoměry vzduchu používané v laboratoři spalovacích motorů na katedře vozidel a motorů strojní fakulty Technické univerzity v Liberci z hlediska výsledku (přesnosti) měření ustáleného průtoku na kalibrační trati.

2. Význam průtokoměrů vzduchu v motoru

Průtokoměry vzduchu jsou nedílnou součástí měřicích systémů ke zjišťování provozních stavů a situací na moderních vozidlových pístových spalovacích motorech, a to jak při výzkumu a vývoji motorů, tak při provozu motoru v běžném provozu automobilu. Jejich úkolem je určit hmotnostní tok vzduchu, který proudí sacím potrubím do válce motoru. To je velmi důležité pro správné stanovení optimálního konstrukčního provedení motoru a z hlediska určení účinnosti naplnění válce čerstvou vzduchovou náplní - tzv. plnicí účinnost:

$$\eta_P = \frac{M_{cv}}{M_{teor}} = \frac{m_{cv}}{m_{teor}} = \frac{m_{cv}}{V_Z \cdot i_v \cdot \rho_1 \cdot \frac{n}{60 \cdot k_M}} \quad (1)$$

Stupeň naplnění válce se také vyjadřuje i objemovou (volumetrickou) účinností:

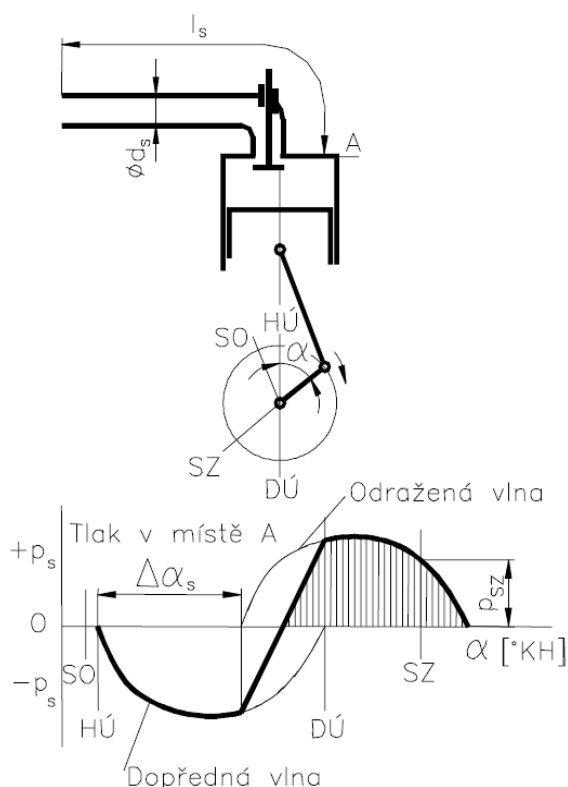
$$\eta_V = \frac{V_S}{V_Z} \quad (2)$$

$$V_S \dots \text{je skutečný spotřebovaný objem vzduchu na válec, } V_S = \frac{M_V}{\rho_1} \quad (3)$$

$$\text{neboli } \eta_V = \eta_P. \quad (4)$$

Z toho tedy vyplývá, že čím větší bude objemová (plnicí účinnost motoru), tím větší bude hmotnostní naplnění válce a tím vyšší bude výkon motoru. Pro zvýšení hmotnostního naplnění se využívají různé způsoby konstrukčního uspořádání plnicí soustavy motoru (např. přeplňování turbodmychadlem).

Jako další z variant jak dosáhnout většího naplnění válce vzduchem → vyšší plnicí účinnost → vyšší výkon, je využití vlnového efektu s akumulovanou kinetickou energií pohybujícího se sloupce vzduchu v potrubí před sacím ventilem. Principiálně se jedná o to, že sací pohyb pístu vyvolá v místě sacího ventilu podtlak, který se jako tlakový rozruch šíří rychlostí zvuku sacím potrubím směrem ke vstupnímu otvoru (konci) sacího potrubí. Tento tlakový rozruch postupně vyvolává pohyb náplně v jednotlivých místech sacího potrubí směrem k válci motoru (obr. 1). Časový průběh se skládá z dopředné podtlakové vlny (od válce k otevřenému sacímu potrubí (náhlá změna průřezu) a odražené přetlakové vlny (otevřené sací potrubí k válci).



Obr. 1: Dynamické jevy v sacím potrubí. [1]

Časový interval ($\Delta\tau_s$) šíření podtlakové vlny od sacího ventilu ke konci potrubí je určen délkou potrubí (l_s) a rychlostí šíření zvuku (a_z):

$$\Delta\tau_s = \frac{l_s}{a_z} \quad (5)$$

rychlost zvuku:

$$a_z = \sqrt{\kappa \cdot r_{vzd} \cdot T_{vzd}} \quad (6)$$

K tomu, aby došlo ke vhodnému průběhu dopředné a odražené vlny, je nutné zvolit správné rozměry sacího potrubí vůči velikosti motoru. [2]

$$\frac{l_s \cdot d_s^2}{z_p \cdot D_v^2} = 1,5 \text{ až } 2,0 \quad (7)$$

U dnešních moderních motorů se ještě používá proměnlivá délka sacího potrubí pro různé otáčky motoru, využívá se rovněž časování ventilů.

Pokud tedy do válce dostaneme větší množství vzduchu, lze tam zároveň dodat zvýšené množství paliva. K dokonalému vyhoření paliva je zapotřebí přivést k 1kg paliva nejméně tzv. teoretické množství suchého vzduchu (L_{VT}). Směs paliva a vzduchu, která obsahuje přesně toto teoretické množství suchého vzduchu, se nazývá směs stechiometrická. Teoretické množství vzduchu (L_{VT}) pro jednotlivá paliva zjistíme výpočtem podle jeho ekonomického složení. Vzájemný poměr mezi palivem a množstvím vzduchu se označuje jako λ (součinitel přebytku vzduchu) a vychází z rovnice.

$$\lambda = \frac{M_v}{M_p \cdot L_{VT}} \quad (8)$$

Pokud je $\lambda = 1$, jedná se o směs stechiometrickou (ideální, 100% bohatost), při $\lambda < 1$ jedná se o směs bohatou (méně vzduchu), při $\lambda > 1$ jde o směs chudou (více vzduchu).

2.1. Specifikace lambda poměrů (bohatosti směsi):

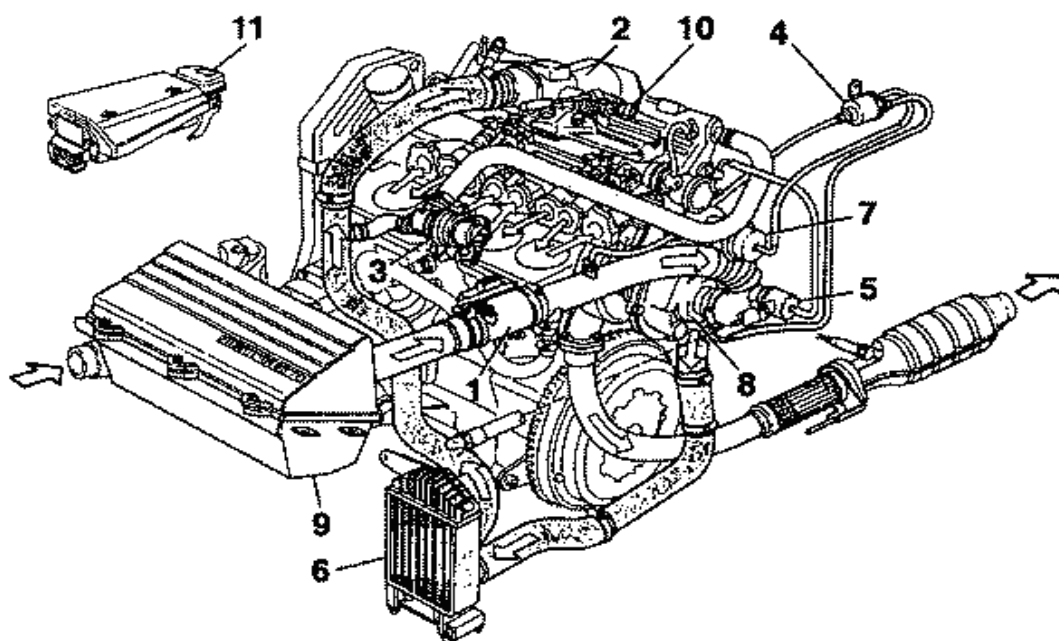
Při $\lambda < 1$ je směs bohatá, z důvodu nedostatku vzduchu dochází k nedokonalému vyhoření paliva a tudíž velice špatných emisí, zejména CO. Z tohoto důvodu a z důvodu nevyužití všeho paliva (vyšší spotřeba), není žádoucí pracovat v tomto režimu. I přes všechna negativa se provoz moderních zážehových motorů na bohatou směs používá při maximálním zatížení motoru. Zvýší se tím hmotnostní naplnění válce motoru a vlivem většího množství tepla potřebného pro odpaření více paliva se sníží teploty spalování a je tak zajištěna ochrana třicestného katalyzátoru před vysokými teplotami výfukových plynů.

Moderní zážehové motory pracují ve většině režimů s $\lambda = 1$. U těchto režimů je důležité přesné odměřování paliva a vzduchu s následnou kontrolou lambda sondou ve výfukových plynech a v případě zjištění jiné bohatosti dojde k úpravě dávkování paliva.

S chudou směsí ($\lambda > 1$) pracují všechny typy vznětových motorů a často se tato koncepce používá u přeplňovaných plynových motorů.

2.2. Měření průtoku vzduchu do motoru

K provoznímu měření průtoku vzduchu do motoru při běžném provozu automobilu musí být průtokoměry vzduchu především rozměrově malé, musí být schopné rychle reagovat na změny provozního režimu motoru a musí poskytovat spolehlivá data o okamžitém průtoku vzduchu elektronické řídicí jednotce (EŘJ), jejímž úkolem je velmi rychlá reakce na aktuální údaj o spotřebě vzduchu (přepočtený EŘJ na hmotnostní naplnění válce) pro určení množství paliva dodávaného palivovým systémem motoru do sacího potrubí nebo válce motoru.



Obr.2: Systém nasávání vzduchu a umístění průtokoměru u vozidla Fiat Punto GT. [9]

Vysvětlivky:

- 1...Průtokoměr vzduchu (žhavený drát)
- 2...Těleso škrťící klapky
- 3...Ventil volnoběžných otáček
- 4...Třícestný magnetický ventil
- 5...Obtokový ventil
- 6...Chladič nasávaného vzduchu
- 7...Regulační tlakový sací ventil
- 8...Turbodmychadlo
- 9...Vzduchový filtr
- 10...Snímač teploty nasávaného vzduchu
- 11...Vnější snímač tlaku vzduchu



Obr. 3: Průtokoměr vzduchu (AC1010160) od firmy ACTRONICS pro Subaru Impreza 2.0i. [10]



Obr. 4: Průtokoměr vzduchu (AC106063) od firmy ACTRONICS pro Škodu Octavia 1.8 Turbo (vlevo: průtokoměr vzduchu instalovaný v měřicím potrubí, uprostřed: samotný průtokoměr vzduchu, vpravo: popis průtokoměru). [10]

Princip měření metodou žhaveného drátu je popsán níže u hmotnostního průtokoměru.

Pro měření spotřeby vzduchu v motoru v etapě výzkumu a vývoje motoru se používají průtokoměry vzduchu laboratorní, u kterých je důležitá přesnost měření (vč. spolehlivosti pro přesný odečet nebo sběr dat měřených veličin) a jejich zástavbové rozměry jsou významné pouze z hlediska jejich instalace na motoru umístěném na zkušebním stanovišti.

V následující části jsou popsány možné koncepce průtokoměrů pro měření průtoku vzduchu do motoru a podrobněji jsou popsány i jednotlivé typy průtokoměrů vzduchu v laboratoři KVM.

Pro vzájemné porovnání vlastností těchto průtokoměrů byla vytvořena měřicí trať, na které byla provedena měření při ustáleném průtoku vzduchu.

Měření průtoku vzduchu do motoru je zdánlivě jednoduchý problém, avšak vzhledem k přetržitému průtoku vzduchu v důsledku sání jednotlivými válci vznikají v sacím potrubí tlakové pulsace, které měření komplikují. Porovnávací měření byla proto rovněž provedena na zkušebním stanovišti se zážehovým motorem.

3. Použité průtokoměry plynů při měření

3.1. Turbinový průtokoměr diskový

3.1.1. Technická data

Výrobce: Ing. Jiří Kňourek

Maximální provozní tlak: 10MPa

Typ: TPD 80

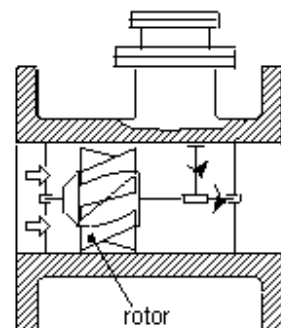
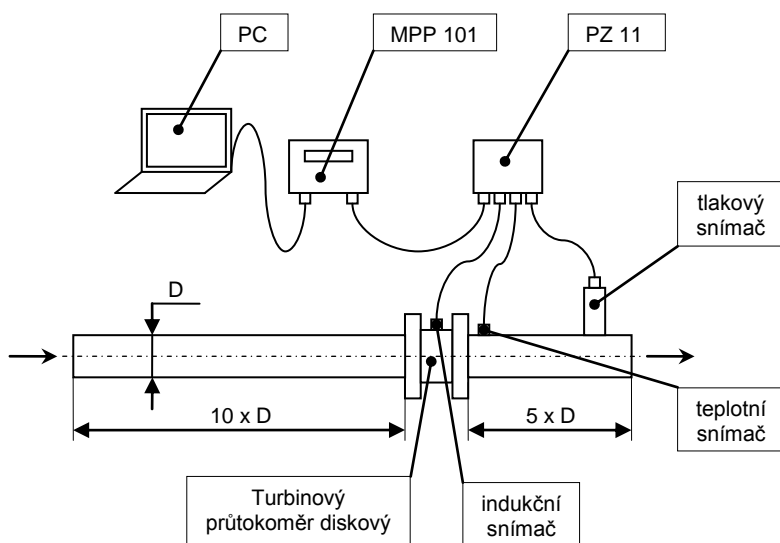
Chyba průtokoměru při kalibraci: $\pm 0,5\%$

Měřicí rozsah: 38 až 380m³.h⁻¹ (0,0105 až 0,105m³.s⁻¹)

3.1.2. Popis průtokoměru

Na obr. 5 je znázorněn systém měření průtoku plynů složený z měřiče průtoku plynů (MPP 101), předzesilovače (PZ 11), turbinového průtokoměru a snímačů tlaku a teploty. Turbinový průtokoměr obsahuje měřicí turbínu, která se díky protékajícímu plynu otáčí s rychlostí

závisející na střední rychlosti proudění. Rotující lopatky turbíny periodicky mění magnetické pole indukčního snímače. Změna magnetického pole indukuje na svorkách snímače napětí, jehož kmitočet je úměrný rychlosti průtoku plynu. Indikované napětí má přibližně sinusový průběh s amplitudou řádu jednotek až stovek milivoltů. K měření tlaku plynu je použit polovodičový snímač, teplota plynu je snímána platinovým měřicím odporem Pt 100. Signály ze snímačů jsou v předzesilovači PZ 11 zesíleny, tvarovány a převedeny do číslicového tvaru, naměřené hodnoty kmitočtu, teploty a tlaku jsou z předzesilovače do měřiče MPP 101 vysílány ve formátu používaném při sériovém přenosu dat. Výslednou hodnotu aktuálního průtoku lze vyčíst přímo na displeji převodníku MPP 101, nebo připojit MPP 101 k počítači pomocí USB kabelu a vyčíst jej z PC.



Obr. 6: Ilustrační schéma turbinového průtokoměru.

Obr.5: Schéma zapojení turbinového průtokoměru diskového. [3] [11]

3.1.3. Instalace průtokoměru

Turbinový průtokoměr diskový byl v laboratoři z každé strany osazen plastovou rourou o vnitřním průměru 84mm (obr. 7). Uklidňovací délka potrubí před průtokoměrem (1400mm) a za ním (600mm), bez problému splňuje požadovanou podmínku montáže (obr. 5).

Při používání turbinového průtokoměru v laboratoři, kde jsou ustálené (normální) podmínky měření barometrického tlaku a teploty. Nejsou zapotřebí dodatečné snímače teploty a tlaku umístěné za turbínou.



Obr. 7: Umístění turbinového průtokoměru v laboratoři.

3.1.4. Výpočtové vztahy

Závislost frekvence otáčení na průtoku je popsána Eulerovou turbinovou rovnicí.

$$f = k_T \cdot Q - s \quad (9)$$

Z toho tedy objemový průtok (Q), který je závislý na frekvenci otáčení (f), skluzu turbíny (s) a konstantě turbinového průtokoměru (k_T).

$$Q = \frac{(f + s)}{k_T} \quad (10)$$

3.2. Hmotnostní průtokoměr

Při kalibračních měřeních byly používány dva hmotnostními průtokoměry stejného výrobce a řady, ale odlišného typu.

3.2.1. Technická data

Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)

Výrobce: Sierra instruments

Maximální provozní tlak: 150PSIG (1 000kPa)

Řada: Sierra620S Fast-Flo

Provozní teplota: -30°C až 70°C

Typ: L04

Průměru potrubí: 54,5mm

Maximální průtok: 3000l/min (0,050m³.s⁻¹)

Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13)

Výrobce: Sierra instruments

Maximální provozní tlak: 150PSIG (1 000kPa)

Řada: Sierra620S Fast-Flo

Provozní teplota: -25°C až 75°C

Typ: L13

Průměr potrubí: 2 až 4 palce

Maximální rychlost proudění: 90m.s⁻¹

3.2.2. Popis průtokoměrů

Průtokoměr vzduchu Fast-FloTM se skládá ze dvou snímacích prvků – senzoru rychlosti a senzoru teploty, který automaticky koriguje změny v teplotě plynu. Je-li na průtokoměr přivedeno napájení, elektronika převodníku ohřívá senzor rychlosti na konstantní rozdíl teploty nad teplotu plynu a měří účinek protékajícího plynu. Elektrický příkon nutný pro udržení konstantního rozdílu teploty je přímo úměrný hmotnostnímu průtoku plynu. Obě čidla jsou platinové teplotní senzory zapouzdřené ve skleněné trubičce. Platinový drát je navinut na robustní keramický trn, který je pevný a stabilní. Senzor je umístěn na špičce snímače z CrNi oceli, která se vkládá do proudu měřeného plynu. Elektronika, která je umístěna v pouzdru přímo na snímači, převádí naměřený příkon u průtokoměru typu L04 na aktuální hmotnostní průtok a u typu L13 na aktuální střední rychlost proudění. Tyto hodnoty zobrazuje přímo na displeji (obr. 9), nebo tu je také možnost propojení průtokoměrů přímo s PC, kde můžeme získat podrobnější záznam měřených hodnot. [4]



Obr.8: Měřič průtoku Fast-FloTM.

3.2.3. Instalace průtokoměrů

Oba dva průtokoměry byly nainstalovány do ocelového potrubí o vnitřním průměru 56mm. Hmotnostní průtokoměr Sierra Inst. 620S L04 byl na tento průměr již zhotoven ve výrobě, druhý průtokoměr typu L13 se musel na toto potrubí přesně nastavit. Požadavky na minimální uklidňovací délky potrubí závisí na použití tvarovek před a za průtokoměrem. Minimální délka potrubí vychází tedy $10 \times D$ před a $5 \times D$ za průtokoměrem, přičemž D označuje vnitřní průměr potrubí. Samotné délky potrubí jsou u typu L04 1300mm před a 700mm za, u typu L13 1700 mm před a 300mm za průtokoměrem. Podmínku montáže tedy splňují oba hmotnostní průtokoměry.



Obr. 9: Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04) umístěn v uklidňovacím potrubí.

3.2.4. Výpočtové vztahy

Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)

U tohoto průtokoměru pouze přepočteme teoretický objemový průtok (Q_T) na normální (skutečné) podmínky.

$$Q_S = Q_T \cdot \left(\frac{p_n}{p_b} \right) \cdot \frac{(273 + t_0)}{273} \quad (11)$$

Q_S ...skutečný aktuální objemový průtok
 t_0 ...teplota vzduchu při měření
 p_b ...barometrický tlak
 p_n ...tlak za normálových podmínek (101,325kPa)

Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13)

U druhého průtokoměru, kde je naměřenou hodnotou střední rychlost průtoku (v_s), vypočteme skutečný objemový průtok (Q_S) za normálních (skutečných) podmínek:

$$Q_S = \left(\frac{S_1}{k_p} \right) \cdot v_s \cdot \left(\frac{p_n}{p_b} \right) \cdot \frac{(273 + t_0)}{273} \quad (12)$$

S_1 ...průřez potrubí
 k_p ...koeficient proudění

3.3. Rotační plynoměr

3.3.1. Technická data

Výrobce: GASELAN, NDR

Maximální provozní tlak: 1MPa

Typ: GZDA DN 150

Chyba průtokoměru při kalibraci: $\pm 1,70\%$

Měřicí rozsah: 30 až 360m³/h (0,00833 až 0,1m³.s⁻¹)

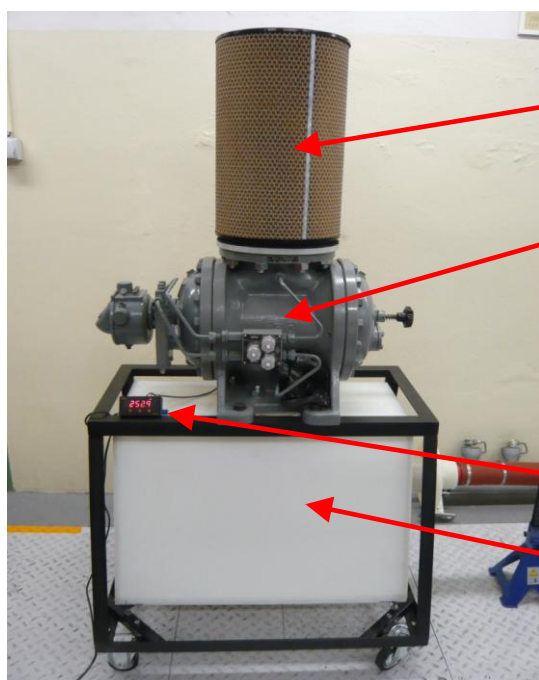
3.3.2. Popis průtokoměru

Rotační plynoměr je vlastně dvouzubý rotor, pohyb rotorů je vzájemně vázán prostřednictvím ozubení. Tlakovou diferencí mezi vstupní a výstupní stranou plynoměru vzniká točivý moment. V okamžiku, kdy tento moment překoná pasivní odpory, uvedou se rotory do

pohybu ve směru proudění. V průběhu rotace se objem mezi rotory a tělesem vyplní dopravovaným plynem. Mezi počtem otáček rotorů a množstvím protékajícího plynu je proto přímá závislost. Rotory se otáčejí velmi lehce, protože nedochází k žádnému vzájemnému kontaktu jednotlivých částí v prostoru měřicí komory. Za měřicí komorou je umístěna nádoba, která slouží k uklidnění proudu vzduchu. Otáčky rotorů jsou převáděny pomocí upraveného převodu do počítadla, které zaznamenává objemový průtok plynu v kubických metrech. Pro určení objemového průtoku při měřeních byl použit elektronický čítač otáček, který pro zadaný objem na jednu otáčku přímo indikoval aktuální průtok vzduchu. [11]



Obr. 10: Ilustrační schéma principu rotačního plynoměru [12]



filtr

rotační plynoměr
(GZDA DN 150)



čítač (RC 102 C).

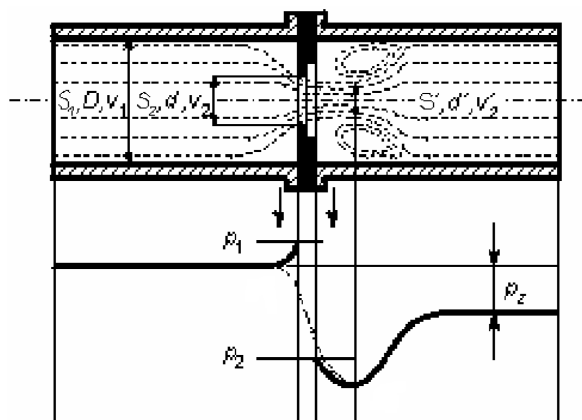
vyrovnávací nádoba

Obr. 11: Rotační plynoměr (GZDA DN 150).

3.4. Průřezové měřidlo - clonka A (s koutovými odběry)

3.4.1. Popis průtokoměru

Je to typ měřidla, které využívá jevů, ke kterým dochází při zúžení průtočného průřezu. Do potrubí se umístí škrticí orgán (clonka), který má menší průtočný otvor než je samotné potrubí. Měří se zde statický tlak před a za clonkou, jejichž rozdíl je závislý na velikosti aktuálního průtoku. V přívodním potrubí se měří ještě statický tlak, z důvodu výpočtu aktuální hustoty vzduchu.



Obr. 12: Proudění a průběh tlaků na cloně. [11]

Vysvětlivky:

S_1 ...průřez potrubí

D ...průměr potrubí

v_1 ...rychlost průtoku vzduchu v potrubí

S_2 ...průřez clonky

d ...průměr clonky

v_2 ...rychlost průtoku vzduchu v clonce

S' ...průřez proudu vzduchu za clonkou

d' ...průměr proudu vzduchu za clonkou

v_2' ...rychlost průtoku vzduchu za clonkou

p_1 ...tlak vzduchu před clonkou

p_2 ...tlak vzduchu za clonkou

p_z ...tlaková ztráta

3.4.2. Popis výpočtových vztahů

Při odvození výpočtových vztahů vyjdeme z rovnice kontinuity toku pro nestlačitelnou kapalinu:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (13)$$

$$\text{kde} \quad S_1 = \frac{\pi}{4} D^2, \quad S_2 = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (14, 15)$$

Při měření ve vodorovném potrubí platí podle Bernoulliho rovnice:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (16)$$

Z rovnice (13) vyjádříme v_1 , dosadíme do (16) a vypočteme rychlost v_2 .

$$\text{Poměr průměrů} \quad \beta = \frac{d}{D} = \sqrt{\frac{S_2}{S_1}}, \text{ pak dostaneme pro objemový průtok vztah:} \quad (17)$$

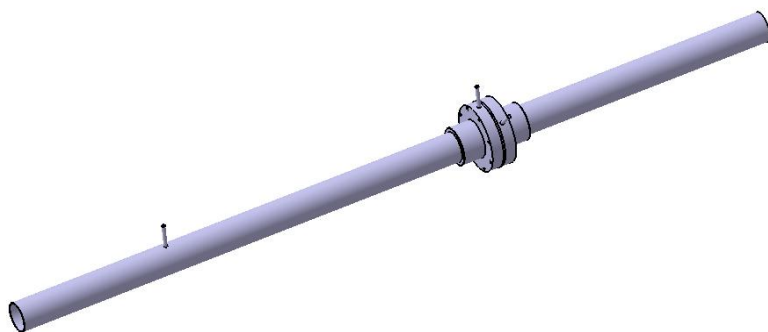
$$Q = S_2 \cdot v_2 = S_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (18)$$

Do tohoto vztahu dále započítáme součinitel průtoku (C), který závisí na geometrii dané clonky s potrubím a Reynoldsově číslu.

Posledním, neméně důležitým, je expanzní součinitel (ε), který zohledňuje expanzi vzduchu po průchodu škrtícím orgánem a následné změně jeho hustoty.

Celkový vzorec pro objemový průtok má potom tvar:

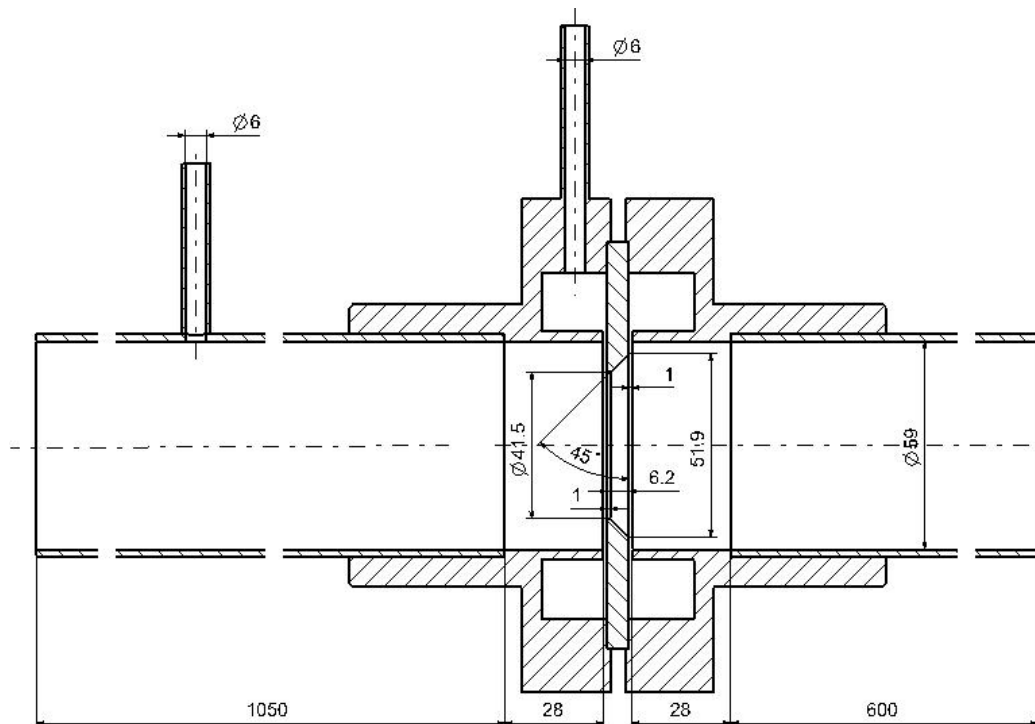
$$Q = C \cdot \varepsilon \cdot S_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho_{vzd}}} \quad (19)$$



Obr. 13: 3D model clonky A.

3.4.3. Instalace clonky

Clonka byla vložena mezi plastové potrubí o vnitřním průměru 59mm. Požadovanou minimální délku uklidňovacího potrubí jsme zjistili z podkladů podle poměru průměrů ($\beta=d/D$) (20) a podle použitých navazujících tvarovek při zapojení v tratích. V těchto případech vychází délka potrubí s nenulovou přídatnou nejistotou $14 \times D$ před a $7 \times D$ za clonkou. Tyto požadavky clonka A splňuje (obr. 14). [5]



Obr. 14: Clonka A v řezu, výstup pro měření statického tlaku za clonkou, zde není zobrazen z důvodu natočení o 45° , viz obr. 13.

3.4.4. Výpočtové vztahy určené k clonce A v laboratoři KVM

Výpočet hmotnostního průtoku vzduchu:

$$m_s = 84,594 \cdot \left(1 - \frac{0,3131 \cdot \Delta p}{p_b - \Delta p_1}\right) \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{vzd}} \quad [kg \cdot h^{-1}; kPa; kg \cdot m^{-3}] \quad (21)$$

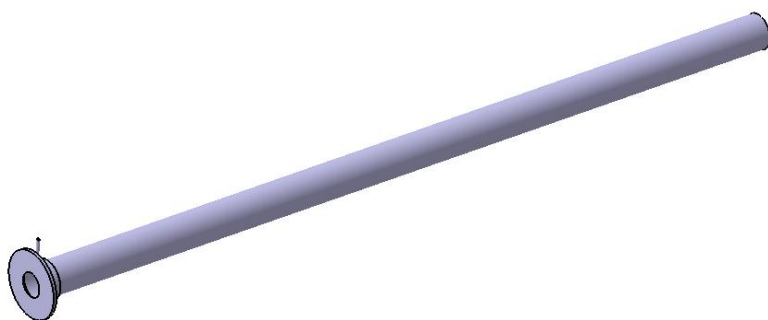
Z kterého poté vypočteme objemový průtok:

$$Q_s = \frac{m_s}{\rho_{vd} \cdot 3600} \quad [m^3 \cdot s^{-1}; kg \cdot h^{-1}; kg \cdot m^{-3}] \quad (22)$$

3.5. Průřezové měřidlo - Clonka B (čelní)

3.5.1. Popis průtokoměru

Toto měřidlo pracuje na obdobném principu jako clonka A. Hlavní rozdíl je v umístění clonky, která zde není v potrubí, ale nachází se z jeho čela (obr. 15). Měří se tu pouze statický tlak za clonkou a jeho rozdíl vůči barometrickému tlaku, odkud je nasáván vzduch, je závislý na velikosti průtoku.



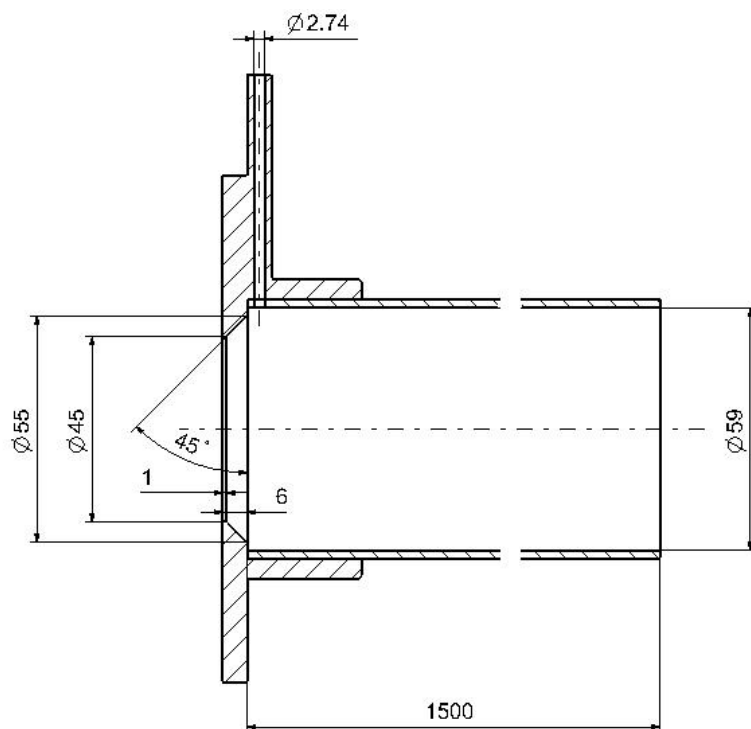
Obr. 15: 3D model clonky B.

3.5.2. Výpočtové vztahy

Odvozování výpočtového vztahu je obdobné jako u clonky A (bod 3.4.2).

3.5.3. Instalace clonky

Clonka zde byla nasazena na plastové potrubí o vnitřním průměru 59mm. Požadovanou minimální délku uklidňovacího potrubí jsme zjistili z podkladů podle poměru průměrů (β) a použitých navazujících tvarovek při zapojení v tratích. V těchto případech vychází délka potrubí s nenulovou přídatnou nejistotou $8 \times D$. Tyto požadavky clonka B splňuje (obr. 16). [5]



Obr. 16: Clonka B v řezu.

3.5.4. Výpočtový vztah určený k clonce B v laboratoři KVM

Výpočet objemového průtoku vzduchu:

$$Q_s = 5,02736 \cdot \left(1 - \frac{0,18466 \cdot \Delta p_2}{p_b} \right) \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_2}{\rho_{vzd}}} \quad [m^3 \cdot h^{-1}; Pa; kg \cdot m^{-3}] \quad (23)$$

3.6. Průřezové měřidlo - Laminární průtokoměr

3.6.1. Technická data

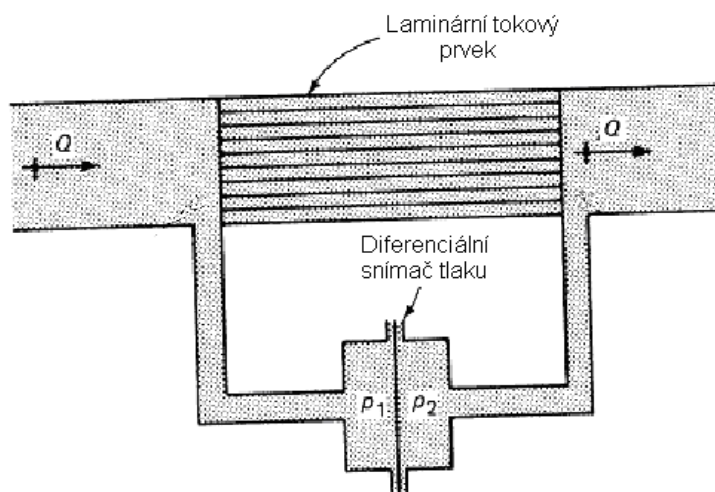
Výrobce: Ricardo Instrument, Manchester, UK

Typ: 50 MC 02-6F

Maximální průtok: $0,300\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

3.6.2. Popis průtokoměru

Laminární průtokoměr pracuje na principu měření průtoku vzduchu měřením tlakového spádu při laminárním proudění vzduchu kanálkem. Vychází se zde ze zákonitostí přesně definovaného laminárního rychlostního profilu v kanálku a lineární závislosti hydraulického odporu na lineárním průtoku vzduchu kanálkem. Průtokoměr je konstruovaný tak, že průtokový průřez měřidla potřebný pro průtočné množství vzduchu je rozdělen na určitý počet menších průtokových kanálků, jejichž charakteristický rozměr a průtočné množství (tj. rychlost) vzduchu kanálkem zajišťují laminární proudění tekutiny v kanálku (obr. 17).



Obr. 17: Schéma uspořádání laminárního průtokoměru. [6]

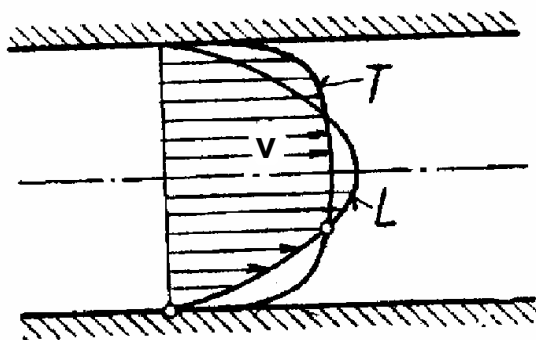


Měří se zde statický tlak před a za těmito průtokovými kanálky, které jsou umístěny v první části hned za filtrem sání, jejichž rozdíl je závislý na velikosti aktuálního průtoku. Střední část průtokoměru je určena k ukladnění proudu vzduchu a možnosti měření tlakové ztráty (změny hustoty vzduchu) v potrubí. V koncové části je možná regulace proudu vzduchu.

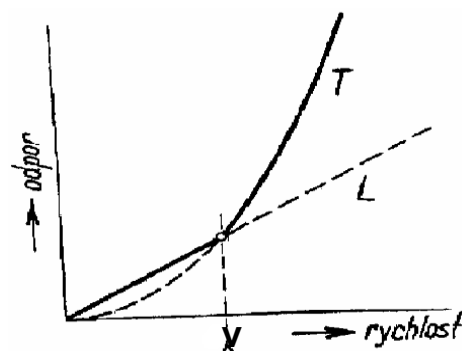
Obr. 18 vlevo: Laminární průtokoměr (50 MC 02-6F).

3.6.3. Proudění vzduchu v kanálcích

Při ustáleném laminárním průtoku vzduchu kanálkem má rychlostní profil v kanálku charakteristický tvar kvadratické paraboly (obr. 19). Laminární průtok kanálkem bude až do dosažení takové hodnoty „střední“ průtokové rychlosti, při které dosáhne Reynoldsovo číslo kritické hodnoty $Re_{krit} \cong 2320$. Při vyšších rychlostech vzduchu v kanálku se laminární průtok změní na turbulentní a změní se i rychlostní profil v proudícím vzduchu kanálkem. Se změnou rychlostního profilu souvisí i změna průtokového odporu (obr. 20).



Obr. 19: Laminární (L) rychlostní profil a turbulentní (T) rychlostní profil při průtoku vzduchu kanálkem. [6]



Obr. 20: Průtokový odpor při laminárním (L) průtoku a při turbulentním (T) průtoku vzduchu kanálkem. [6]

Při proudění vzduchu v kanálu rychlostí do Re_{krit} je průtokový odpor lineárně závislý na rychlosti průtoku (tj. na průtočném množství), proudění rychlostí nad Re_{krit} se průtokový odpor začne odchylovat od lineárního průběhu směrem k vyšším hodnotám.

Reynoldsovo číslo je definováno vztahem:

$$Re_D = \frac{v_s \cdot D}{\nu} = \frac{v_s \cdot D \cdot \rho_{vzd}}{\mu} \quad (24)$$

Rychlostní profil při laminárním proudění má tvar kvadratické paraboly (pro kruhový průřez to bude rotační paraboloid). Maximální rychlost uprostřed průřezu (tj. pro $y = 0$) potom bude:

$$v_{max} = \frac{R^2}{4 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{D^2}{16 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (25)$$

Objemový průtok popisuje rovnice:

$$Q = \frac{\pi}{8 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot R^4 = \frac{\pi}{128 \cdot \mu} \cdot D^4 \quad (26)$$

Střední velikost rychlosti proudění potom bude:

$$v_s = \frac{Q}{\pi \cdot R^2} = \frac{R^2}{8 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{D^2}{32 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (27)$$

Porovnáním s dříve vypočtenou maximální rychlostí v_{max} je střední rychlost laminárního proudění poloviční:

$$v_s = \frac{1}{2} \cdot v_{max} \quad (28)$$

Skutečnost, že maximální i střední rychlost laminárního proudu závisí na rozměru kanálu, na dynamické viskozitě a na hydraulickém odporu (tlakovém spádu dp/dx), je pro měření průtoku velkou výhodou. Ke stanovení průtoku pro známé geometrické rozměry kanálu a známou dynamickou viskozitu tekutiny postačí tedy změřit, jak už bylo řečeno, tlakový spád na průtokových kanálcích měřidla.

3.6.4. Výpočtové vztahy určené k laminárnímu průtokoměru

Výpočet teoretického množství protékajícího vzduchu: [7]

$$Q_T = 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta p \quad \left[m^3 \cdot s^{-1}; mmH_2O \right] \quad (29)$$

Přepočet na normální (skutečné) podmínky měření:

$$Q_S = V_T \cdot \frac{273}{273 + t_o} \cdot \frac{p_b - \Delta p}{p_n} \quad (30)$$

3.7. Průřezové měřidlo - Venturiho dýza

3.7.1. Technická data

Výrobce: Colorado, USA

Maximální průtok: $0,3775 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Typ: Larco

Průtokoměr byl zapůjčen z firmy Škoda Auto.

3.7.2. Popis průtokoměru

V tomto případě se jedná o čelní Venturiho dýzu, která nesmí být umístěna do potrubí, ale jen na začátek. Jde v podstatě o nátrubek, jehož vtoková strana je zvonově rozevřena, výtoková strana se kuželovitě rozšiřuje až na průměr potrubí. Rozdíl mezi barometrickým tlakem, odkud je nasáván vzduch a statickým tlakem v místě největšího zúžení je závislý na velikosti průtoku. Dýza byla spojena přírubou s ocelovou trubkou, která svým rozměrem splňuje podmínku pro uklidnění proudu vzduchu. Na konci trubky je možná i regulace proudu vzduchu (obr. 21). [5], [11]



Obr. 21: Venturiho dýza (Larco).

3.7.3. Výpočtové vztahy

Výpočet aktuálního průtoku pro tento konkrétní typ průtokoměru, byl poskytnut, z důvodu jeho obsáhlosti a množství konstant, ve formě zadaných vztahů v excel souboru (přiloženo na CD).

4. Porovnávací měření v laboratoři

Průtokoměry vzduchu byly porovnány zapojením do měřicí tratě. Trať byla sestavena vzájemným propojením jednotlivých průtokoměrů v jedné řadě za sebou. Všechna měřidla nebylo možné zapojit najednou, celý program porovnávacích měření byl postupně proveden v několika sériích uspořádání měřidel do měřicí tratě. Jako generátor proudění vzduchu byl využit ventilátor, který byl v laboratoři a rozměrově a výkonově vyhovoval měřeným průtokoměrům.

Technická data

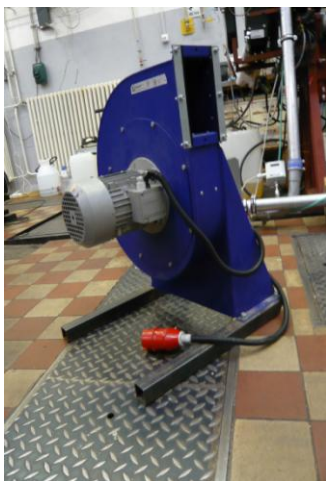
Výrobce: Vzduchotechnik s.r.o. Chrastava, ČR

Typ ventilátoru: Livent 12

Maximální průtok: $1200\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ($0,333\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)

Výkon: 1,1kW

Pracovní přetlak: 1800Pa



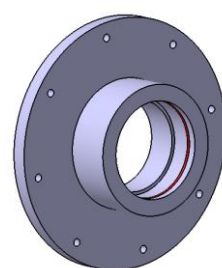
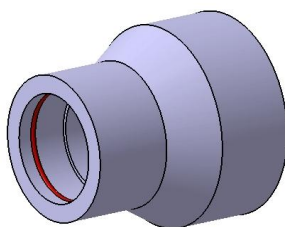
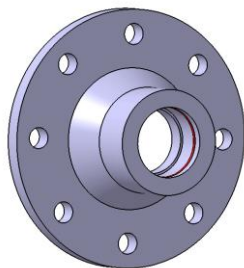
Obr. 22 vlevo: Ventilátor (Livent 12)

Jako nejjednodušší a neúčinnější varianta pro regulaci průtoku vzduchu při měřeních bylo použito škrcení výstupu vzduchu z ventilátoru. Byl zhotoven jednoduchý mechanismus posuvné clony, která je uložena v bočním vedení k výstupnímu průřezu ventilátoru (obr. 23).

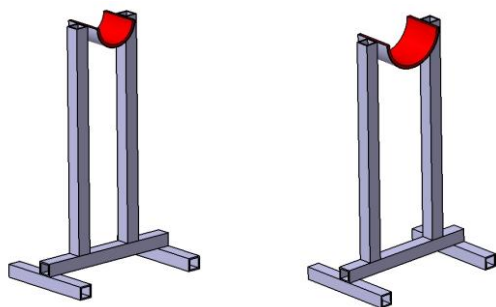


Obr. 23 vlevo: Zleva: clona zcela otevřena, clona z ½ otevřena, clona zavřena.

Propojení jednotlivých měřidel se provádělo pomocí přírub a redukcí, které byly vyrobeny z plastu (silon) vždy podle konkrétních rozměrů. Dotěsnění jednotlivých přírub a redukcí se provedlo silikonovým tmelem.



Obr. 24: Zleva: 3D model příruby 60 (laminární průtokoměr – hmotnostní průtokoměr), redukce 60-90 (hmotnostní průtokoměr – turbinový průtokoměr diskový), příruby 90 (turbinový průtokoměr diskový – ventilátor).



Pro sestavení měřicí tratě a podepření průtokoměrů v sestavě byly rovněž vyrobeny stojany (obr. 25).

Obr. 25 vlevo: Zleva: 3D model stojanu 60 (hmotnostní průtokoměr), 3D model stojanu 90 (turbínový průtokoměr diskový).

Při měření tlakových spádů na clonkách A a B, na laminárním průtokoměru a Venturiho dýze se použil přenosný digitální manometr DM 9200.

Technická data

Typ měřidla: DM 9200

Měřicí rozsah: -75,0hPa až +75hPa

Rozlišení: 0,1Pa

Přesnost: $\pm 1\%$ měř. hodnoty

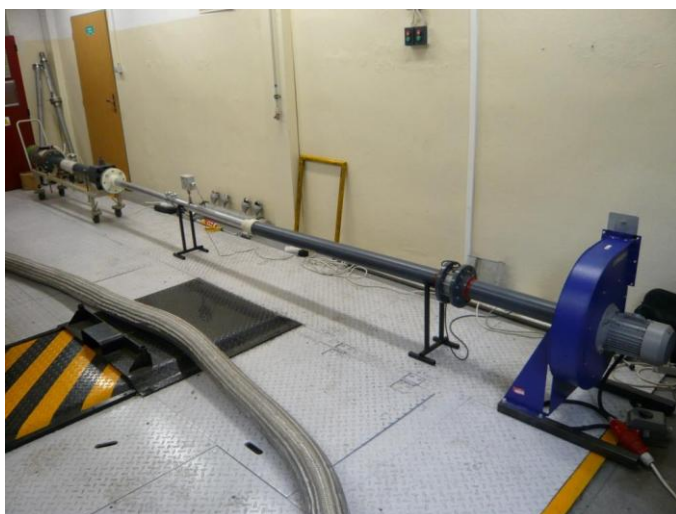


Obr. 26 vlevo: Digitální manometr DM 9200, pravý vstup „plus“ slouží k přivedení přetlaku nebo atmosférického tlaku, levý vstup s označením „mínus“ slouží k přivedení podtlaku. Výsledná hodnota je rozdílem těchto dvou tlaků.

4.1. Měřicí trať pro 1. sérii porovnávacích testů

4.1.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Laminární průtokoměr (50 MC 02-6F)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)
- Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)
- Ventilátor (Livent 12)



Obr. 27: Měřicí trať pro 1. sérii porovnávacích testů.

Odečítání tlakových hodnot z jednotlivých průtokoměrů: u laminárního průtokoměru před a za průtokovými kanálky (ve směru proudu vzduchu), tj. byl měřen rozdíl mezi statickým tlakem za průtokoměrem a tlakem barometrickým. Hmotnostní průtokoměr zobrazuje údaj o aktuálním průtoku přímo na displeji samotného přístroje. Turbinový průtokoměr byl propojen USB kabelem s převodníkem, který přímo zobrazuje údaj o aktuálním průtoku.



proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu φ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. suchého vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
97,07	20,3	46,2	2337	287,1	1,158

Tab. 1: Atmosférické podmínky při 1. sérii měření.

$$\text{Výpočet hustoty vlhkého vzduchu: } \rho_{vzd} = \frac{p_b}{r_{vzd} \cdot T_{vzd}} \cdot \left(1 - 0,378 \cdot \varphi_{vzd} \cdot \frac{p_{parc}}{p_b} \right) \quad (31)$$

Po sestavení měřicí tratě byl pomocí clony na ventilátoru zjištěn minimální a maximální průtok vzduchu tratí. Rozsah tohoto průtoku byl rozdělen do 10 úrovní, ve kterých byla provedena porovnávací měření (tab. 2). U žádného z průtokoměrů nebyl překročen dovolený průt vzduchu.

Laminární průtokoměr:

Naměřené hodnoty tlaku byly přepočteny pomocí vztahů dodaných k průtokoměru.

$$\text{teoretický objemový průtok: } Q_T = 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta p \quad \left[m^3 \cdot s^{-1}; mmH_2O \right] \quad (32)$$

$$\text{skutečný objemový průtok: } Q_s = Q_T \cdot \frac{273}{273 + t_o} \cdot \frac{p_b - \Delta p}{p_n} \quad (33)$$

Hmotnostní průtokoměr:

Naměřené hodnoty jsou přepočteny na normální podmínky.

$$\text{skutečný objemový průtok: } Q_s = Q_T \cdot \left(\frac{p_n}{p_b} \right) \cdot \frac{(273 + t_0)}{273} \quad (34)$$

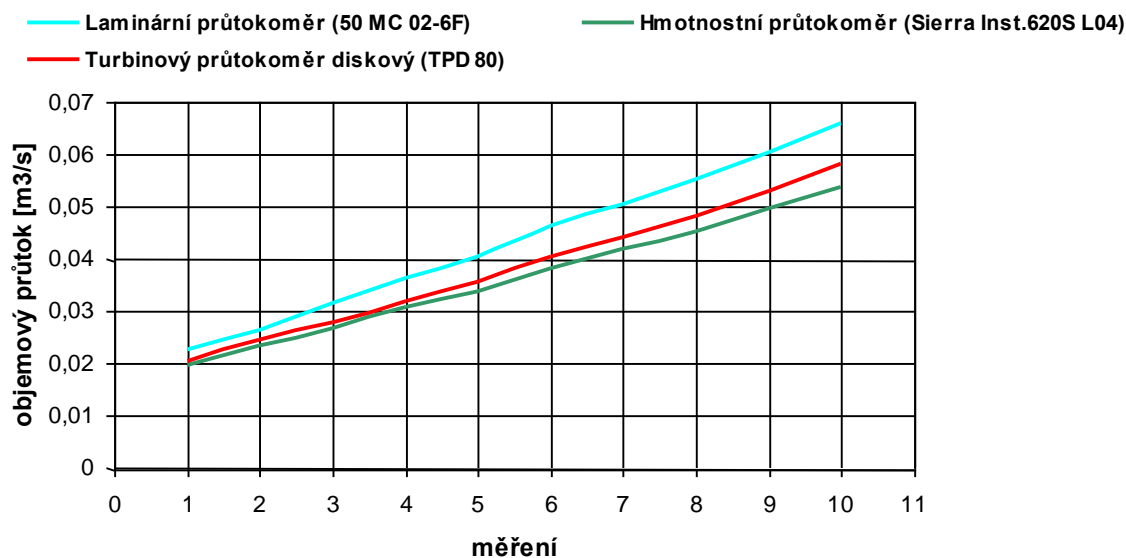
Turbinový průtokoměr diskový:

Zaznamenaný průtok byl pouze přepočtený na stejné jednotky jako u ostatních průtokoměrů.

č. měření	Laminární průtokoměr (50 MC 02-6F)						Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)		Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)	
	měřeno		spočteno				teoretický objemový průtok Q_T (l/min)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /h)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
	rozdlíl tlaku Δp_1 (Pa)	rozdlíl tlaku Δp_2 (hPa)	rozdlíl tlaku $\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1$ (Pa)	rozdlíl tlaku Δp (mmH ₂ O)	teoretický objemový průtok Q_T (m ³ /s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)				
1	17,3	1,4	122,7	12,5	0,0255	0,0227	1045	0,0195	74	0,0206
2	22	1,64	142	14,5	0,0295	0,0263	1253	0,0234	88	0,0244
3	26,5	1,96	169,5	17,3	0,0353	0,0314	1432	0,0268	100	0,0278
4	32,3	2,28	195,7	20,0	0,0407	0,0362	1637	0,0306	115	0,0319
5	37,5	2,56	218,5	22,3	0,0455	0,0404	1803	0,0337	128	0,0356
6	45,7	2,95	249,3	25,4	0,0519	0,0461	2048	0,0383	145	0,0403
7	53	3,25	272	27,7	0,0566	0,0503	2232	0,0417	159	0,0442
8	60	3,58	298	30,4	0,0620	0,0551	2415	0,0451	173	0,0481
9	69,8	3,97	327,2	33,4	0,0681	0,0605	2652	0,0496	191	0,0531
10	80	4,36	356	36,3	0,0741	0,0658	2882	0,0539	209	0,0581

Tab. 2: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (laminární průtokoměr, hmotnostní průtokoměr, turbinový průtokoměr diskový).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 1, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 1: Porovnání průtokoměrů vzduchu při první sérii měření.

4.1.5. Zhodnocení

Z grafu je patrné, že s rostoucím průtokem dochází k výrazným odchylkám naměřených průtoků u jednotlivých průtokoměrů. Celkové posouzení správnosti měření bude možné provést až po měření s dalšími průtokoměry.

4.2. Měřicí trať pro 2. sérii porovnávacích testů

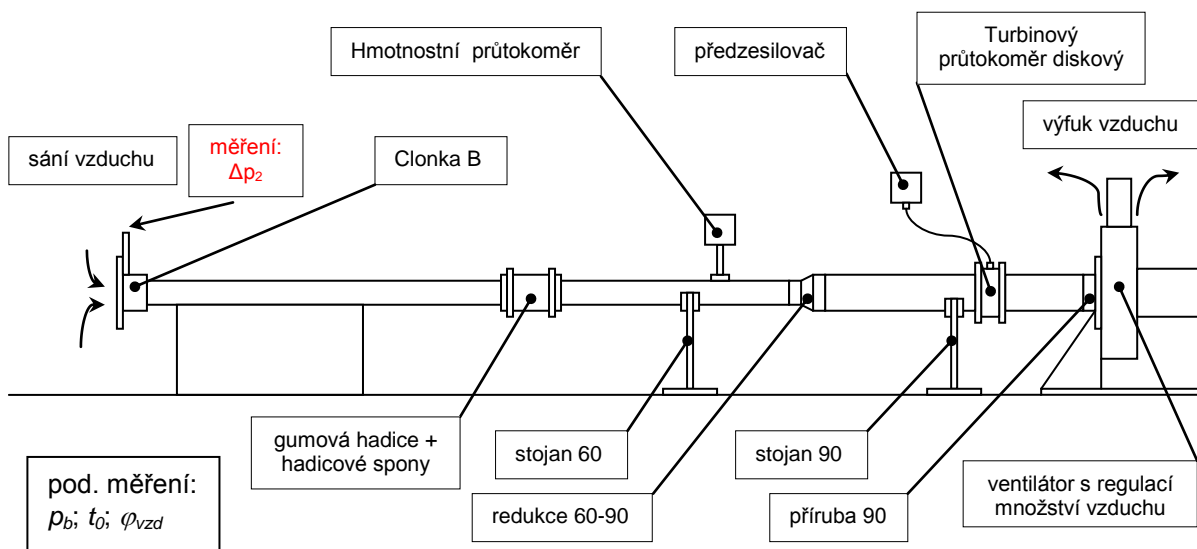
4.2.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Clonka B (čelní)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)
- Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)
- Ventilátor (Livent 12)



Odečítání naměřených hodnot z hmotnostního a turbinového průtokoměru bylo stejné jako v 1. sérii (bod 4.1.1.). U clonky B se měřil rozdíl mezi aktuálním tlakem za clonkou a tlakem barometrickým (obr. 30).

Obr. 29 vlevo: Měřicí trať pro 2. sérii porovnávacích testů.



Obr. 30: Schéma měřicí trati pro 2. sérii porovnávacích testů.

4.2.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu φ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
97,24	20,2	45,8	2337	287,1	1,160

Tab. 3: Atmosférické podmínky při 2. sérii měření.

4.2.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.2.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Clonka B (čelní):

Naměřené hodnoty tlaku byly upraveny a dosazeny do vztahu dodaném k průtokoměru.

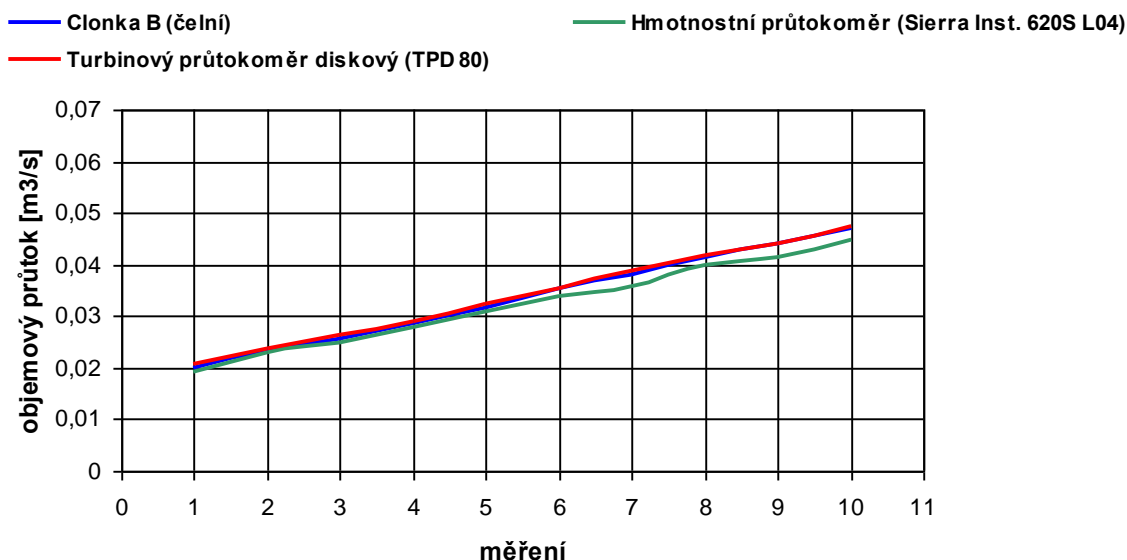
$$\text{skutečný objemový průtok: } Q_s = 5,02736 \cdot \left(1 - \frac{0,18466 \cdot \Delta p_2}{p_b} \right) \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_2}{\rho_{vzd}}} \left[m^3 \cdot h^{-1}; Pa; kg \cdot m^{-3} \right] \quad (35)$$

Hodnoty hmotnostního a turbinového průtokoměru diskového byly upraveny jako u první měřicí tratě (bod 4.1.4.).

č. měření	Clonka B (čelní)			Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)		Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)	
	měřeno	spočteno		měřeno	spočteno	měřeno	spočteno
	rozdíl tlaku Δp_2 (mBar)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /h)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)	teoretický objemový průtok Q_T (l/min)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /h)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	2,38	71,97	0,0200	1030	0,0192	74	0,0206
2	3,23	83,83	0,0233	1230	0,0229	86	0,0239
3	3,95	92,69	0,0257	1342	0,0250	95	0,0264
4	4,91	103,32	0,0287	1500	0,0280	105	0,0292
5	6,01	114,29	0,0317	1650	0,0308	117	0,0325
6	7,48	127,47	0,0354	1811	0,0338	128	0,0356
7	8,56	136,33	0,0379	1912	0,0356	140	0,0389
8	10,21	148,84	0,0413	2130	0,0397	151	0,0419
9	11,56	158,34	0,0440	2214	0,0413	159	0,0442
10	13,25	169,47	0,0471	2410	0,0449	171	0,0475

Tab. 4: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (clonka B, hmotnostní průtokoměr, turbinový průtokoměr diskový).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 2, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 2: Porovnání průtokoměrů vzduchu při druhé sérii měření.

4.2.5. Zhodnocení

Graf ukazuje vyrovnanost všech tří průtokoměrů, pouze hmotnostní průtokoměr v druhé půli měření zobrazuje určitou odchylku.

4.3. Měřicí trať pro 3. sérii porovnávacích testů

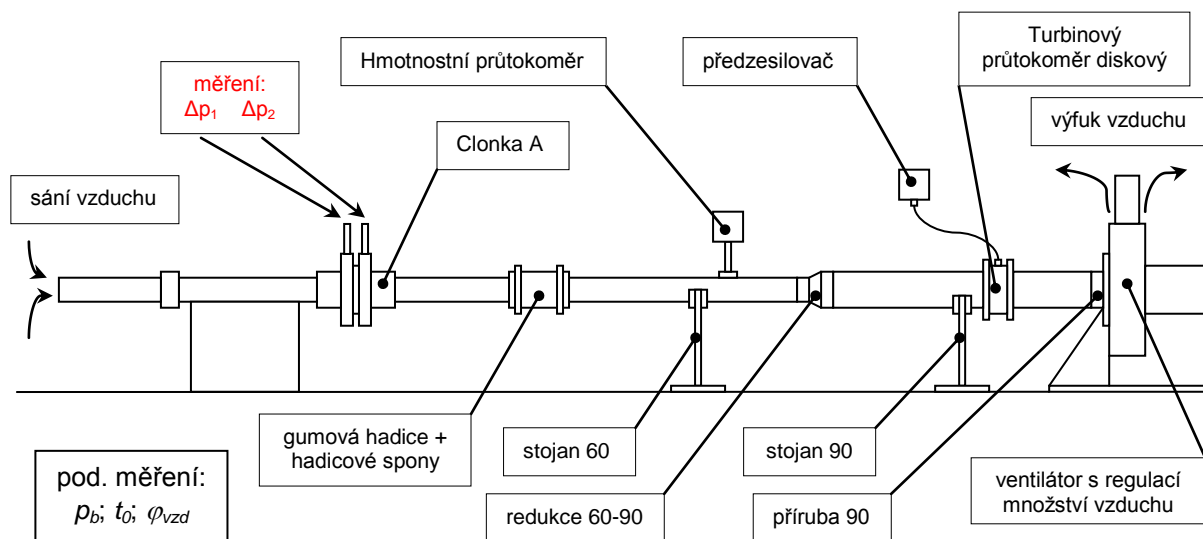
4.3.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Clonka A (s koutovými odběry)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)
- Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)
- Ventilátor (Livent 12)



Obr. 31: Měřicí trať pro 3. sérii porovnávacích testů.

Odečítání naměřených hodnot z hmotnostního a turbinového průtokoměru bylo také stejné jako v 1. sérii (bod 4.1.1.). U clonky A se měřil rozdíl mezi aktuálním tlakem a tlakem barometrickým před a za clonkou (obr. 32).



Obr. 32: Schéma měřicí tratě pro 3. sérii porovnávacích testů.

4.3.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu φ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
97,22	20,2	45,7	2337	287,1	1,160

Tab. 5: Atmosférické podmínky při 3. sérii měření.

4.3.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.3.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Clonka A (s koutovými odběry):

Naměřené hodnoty tlaku byly upraveny a dosazeny do vztahů dodané k průtokoměru.

$$\text{hmotnostní průtok: } m_s = 84,594 \cdot \left(1 - \frac{0,3131 \cdot \Delta p}{p_b - \Delta p_1}\right) \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{vzd}} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}; \text{kPa}; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (36)$$

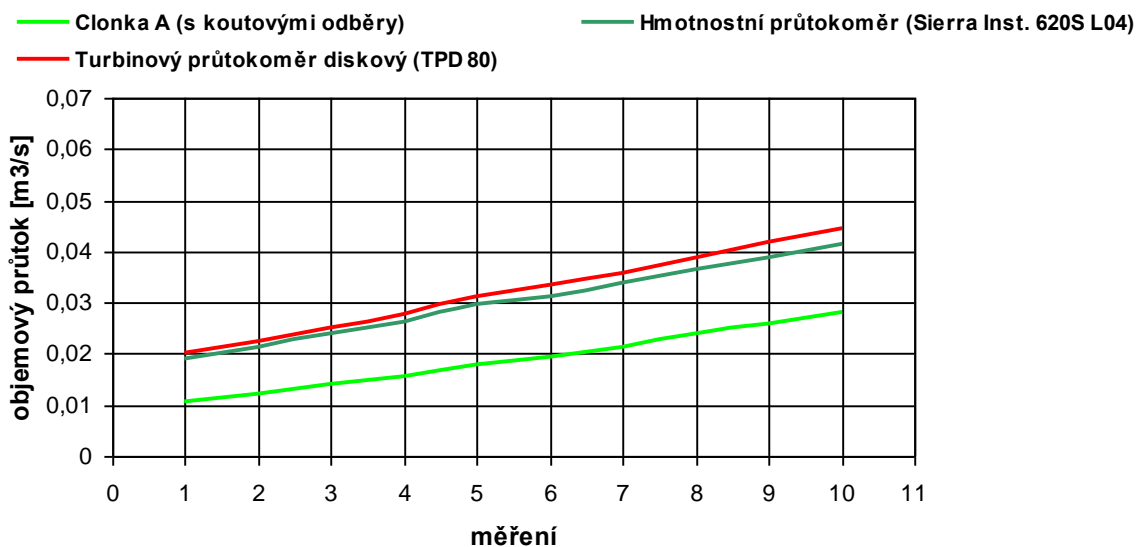
$$\text{skutečný objemový průtok: } Q_s = \frac{m_{sk}}{\rho_{vzd} \cdot 3600} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (37)$$

Hodnoty hmotnostního a turbinového průtokoměru diskového byly upraveny jako u první měřicí tratě (bod 4.1.4.).

č. měření	Clonka A (s koutovými odběry)					Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)		Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)	
	měřeno		spočteno			měřeno	spočteno	měřeno	spočteno
	rozdíl tlaku Δp_1 (Pa)	rozdíl tlaku Δp_2 (hPa)	rozdíl tlaku $\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1$ (Pa)	hmotnostní průtok m_s (kg/h)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)				
1	45,5	2,69	223,5	45,00	0,0108	1010	0,0188	73	0,0202
2	57	3,36	279	50,82	0,0122	1145	0,0213	81	0,0225
3	70,8	4,32	361,2	58,57	0,0140	1290	0,0241	91	0,0253
4	85,2	5,2	434,8	65,10	0,0156	1414	0,0263	100	0,0278
5	106	6,58	552	74,74	0,0179	1583	0,0295	112	0,0311
6	118	7,58	640	81,33	0,0195	1682	0,0314	120	0,0333
7	141	8,85	744	89,47	0,0214	1805	0,0337	129	0,0358
8	165	10,48	883	99,49	0,0238	1963	0,0366	140	0,0389
9	187	12	1013	108,54	0,0260	2085	0,0389	150	0,0417
10	207	13,52	1145	117,31	0,0281	2217	0,0413	160	0,0444

Tab. 6: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (clonka A, hmotnostní průtokoměr, turbinový průtokoměr diskový).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 3, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 3: Porovnání průtokoměrů vzduchu při třetí sérii měření.

4.3.5. Zhodnocení

Výsledný průběh průtoku hmotnostního a turbinového průtokoměru odpovídá předchozím dvěma měřením, v první polovině se drží turbinový vždy těsně nad hmotnostním, druhé půli se začínají mírně rozcházet.

Graf ale zásadním způsobem ukazuje výraznou odchylku u clonky A, což může znamenat pouze:

- 1) špatný technický stav průtokoměru
- 2) chybný vztah dodaný k průtokoměru

4.3.6. Hledání příčiny odchylky

Jako první byl prověřen technický stav průtokoměru. Celá clonka A byla rozebrána, zdali není někde nějaká závada. Po prozkoumání všech důležitých částí průtokoměru nebyl žádný významnější problém nalezen.

Druhou možnou příčinou byl chybný vztah dodaný k průtokoměru. Z příslušných podkladů byl tedy sestaven nový vztah pro porovnání správnosti vypočtených průtoků.

4.3.7. Výpočet průtoku podle vlastních podkladů

Nejprve byl vyjádřen poměr průměrů (β):

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (38)$$

Jelikož poměr průměrů (β) vyšel větší než 0,5, platí vztah pro výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re_D \geq 16000 \cdot \beta^2 \quad (39)$$

Z těchto dvou hodnot spočteme součinitel průtoku (C), který je dán Reader-Harris/Gallagherovou rovnicí:

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + \left(0,0188 + 0,0063 \cdot \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,8} \right) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} \quad (40)$$

Součinitel expanze (ε), který zohledňuje stlačitelnost vzduchu, vyjádříme ze vztahu:

$$\varepsilon = 1 - \left(0,41 + 0,35 \cdot \beta^4 \right) \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} \quad (41)$$

Tyto spočtené hodnoty byly dosazeny do výsledného vztahu pro výpočet hmotnostního toku, tedy:

$$m_s = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_{vzd}} \quad (42)$$

Z toho výsledný objemový průtok:

$$Q_s = \frac{m_s}{\rho_{vzd}} \quad (43)$$

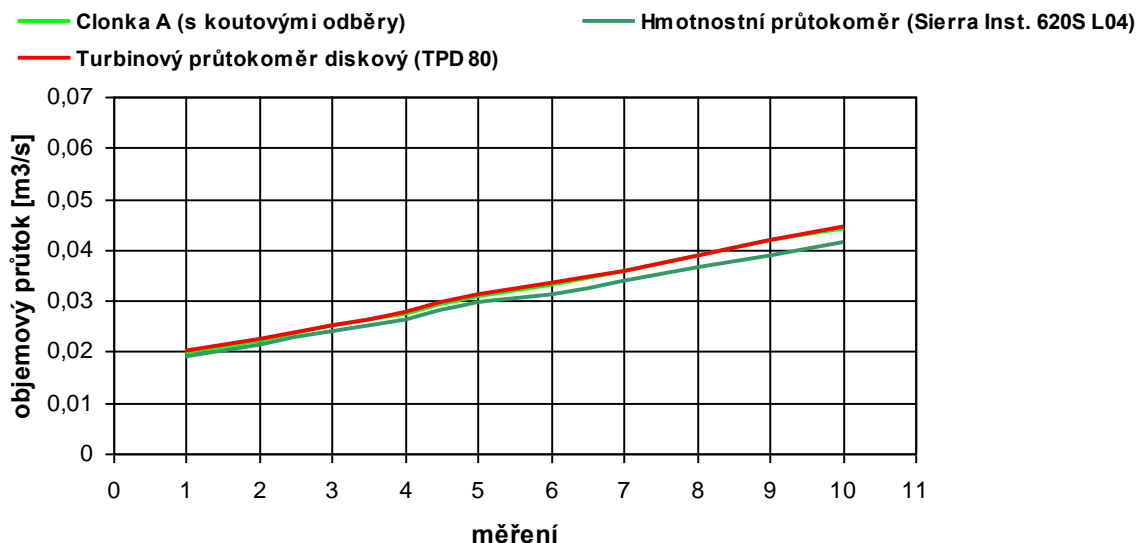
Clonka A (s koutovými odběry)		
poměr průměrů $\beta=d/D$ (-)	Reynoldsovo číslo Re_D (-)	součinitel průtoku C (-)
0,7034	7916,12	0,6435

Tab. 7: Tabulka vypočtených hodnot clonky A.

č. měření	Clonka A (s koutovými odběry)					
	měřeno		spočteno			
	rozdí tlaku Δp_1 (Pa)	rozdí tlaku Δp_2 (hPa)	rozdí tlaku $\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1$ (Pa)	součinite l expanze ε (-)	hmotnostn í tok m_s (kg/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	45,5	2,69	223,5	0,9992	0,0227	0,0196
2	57	3,36	279	0,9990	0,0254	0,0219
3	70,8	4,32	361,2	0,9987	0,0289	0,0250
4	85,2	5,2	434,8	0,9984	0,0317	0,0274
5	106	6,58	552	0,9980	0,0357	0,0308
6	118	7,58	640	0,9977	0,0385	0,0332
7	141	8,85	744	0,9973	0,0415	0,0358
8	165	10,48	883	0,9968	0,0451	0,0390
9	187	12	1013	0,9963	0,0483	0,0417
10	207	13,52	1145	0,9958	0,0514	0,0443

Tab. 8: Tabulka naměřených a přepočítaných hodnot clonky A.

Výsledné přepočítané hodnoty objemového průtoku clonky A jsou vyneseny do grafu 4., kde jsou porovnány se zbylými dvěma průtokoměry.



Graf 4: Porovnání průtokoměrů vzduchu při třetí sérii měření s přepočítanými hodnotami clonky A.

4.3.8. Zhodnocení

Z výsledného grafu je zřejmé, že průtokoměr clonka A přesně kopíruje turbinový průtokoměr diskový. Dá se tedy předpokládat správnost funkce onoho průtokoměru, chyba tedy byla ve vztahu k němu dodaném. Hmotnostní průtokoměr, jak už bylo řečeno, ukazuje v druhé polovině měření určitou odchylku.

4.4. Měřicí trať pro 4. sérii porovnávacích testů

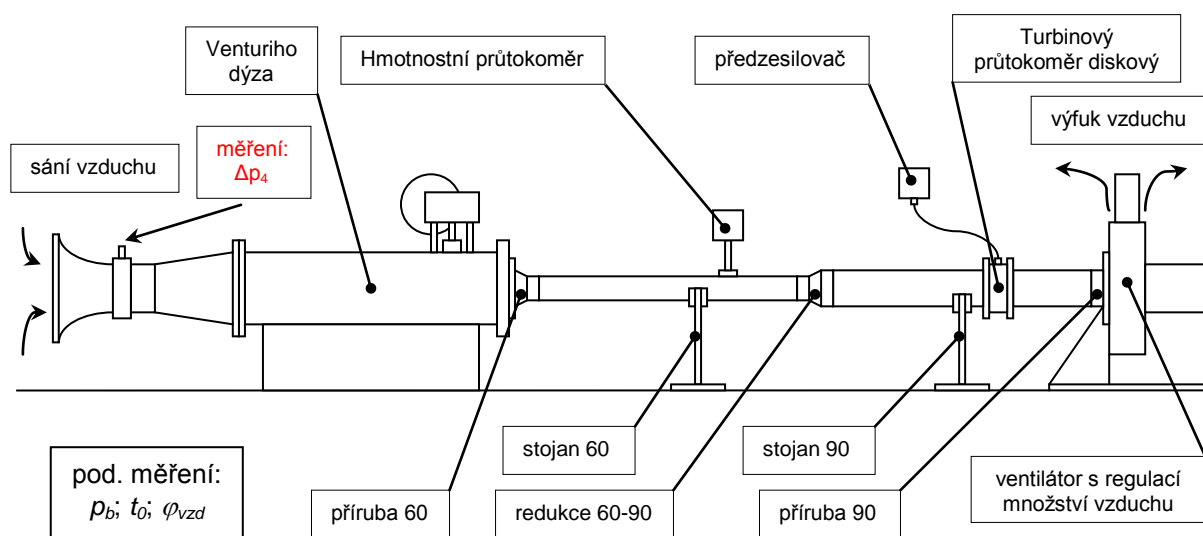
4.4.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Venturiho dýza (Larco)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)
- Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)
- Ventilátor (Livent 12)



Odečítání naměřených hodnot z hmotnostního a turbinového průtokoměru bylo stejné jako v 1. sérii (bod 4.1.1.). U Venturiho dýzy se měřil rozdíl mezi statickým tlakem v místě největšího zúžení a tlakem barometrickým (obr. 34).

Obr. 33 vlevo: Měřicí trať pro 4. sérii porovnávacích test.



Obr. 34: Schéma měřicí tratě pro 4. sérii porovnávacích testů.

4.4.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_0 (°C)	vlhkost vzduchu φ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
97,19	20,2	45,7	2337	287,1	1,159

Tab. 9: Atmosférické podmínky při 4. sérii měření.

4.4.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.4.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Venturiho dýza (Larco):

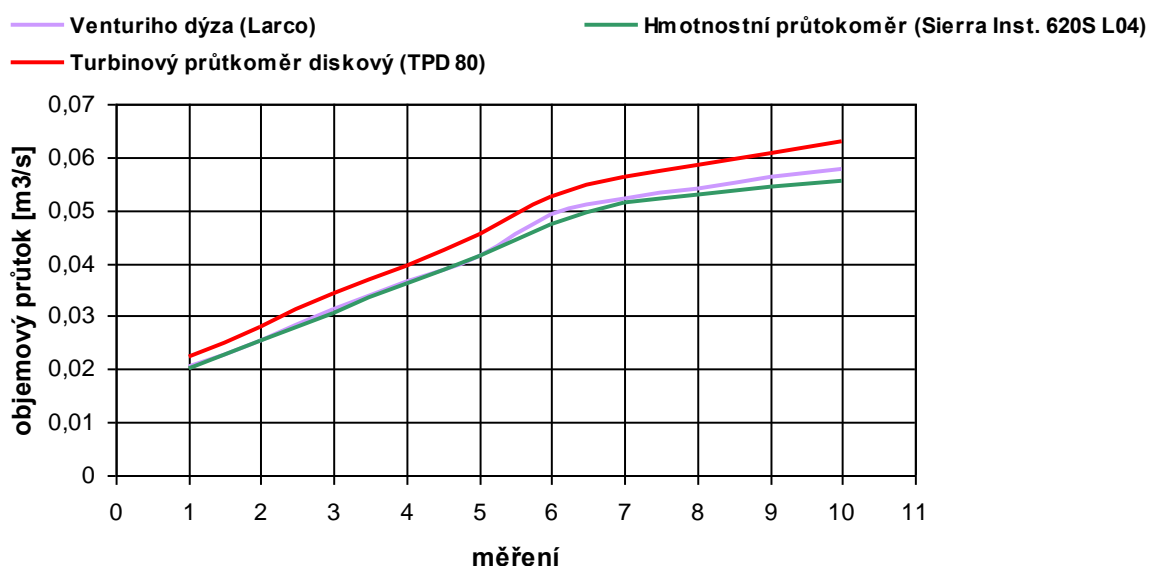
Výsledný výpočet aktuálního průtoku pro tento konkrétní typ průtokoměru, byl poskytnut ve formě zadaných vztahů v excel souboru (přiloženo na CD).

Hodnoty hmotnostního a turbinového průtokoměru diskového byly upraveny jako u první měřicí tratě (bod 4.1.4.).

č. měřen	Venturiho dýza (Larco)				Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)		Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)	
	měřeno rozdí tlaku Δp_4 (Pa)	spočteno			měřeno teoretický objemový průtok Q_T (l/min)	spočteno skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)	měřeno skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /h)	spočteno skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)
		rozdí tlaku Δp_4 (mmH ₂ O)	skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /min)	skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)				
1	7,6	0,8	1,22	0,0203	1080	0,0202	81	0,0225
2	12	1,2	1,53	0,0255	1362	0,0254	101	0,0281
3	18,1	1,8	1,88	0,0313	1635	0,0305	123	0,0342
4	24,3	2,5	2,18	0,0363	1936	0,0361	142	0,0394
5	31,8	3,2	2,49	0,0415	2213	0,0413	163	0,0453
6	45	4,6	2,96	0,0493	2530	0,0472	189	0,0525
7	50	5,1	3,12	0,0520	2750	0,0513	202	0,0561
8	53,5	5,5	3,23	0,0538	2830	0,0528	211	0,0586
9	58,8	6,0	3,38	0,0563	2922	0,0545	219	0,0608
10	61,5	6,3	3,46	0,0577	2982	0,0557	226	0,0628

Tab. 10: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (Venturiho dýza, hmotnostní průtokoměr, turbinový průtokoměr diskový).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 5, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 5: Porovnání průtokoměrů vzduchu při čtvrté sérii měření.

4.4.5. Zhodnocení

Z grafu opět vyplývá větší naměřený aktuální průtok u turbinového průtokoměru diskového oproti hmotnostnímu průtokoměru. Venturiho dýza vesměs zatím potvrzuje průtok hmotnostního průtokoměru.

4.5. Měřicí trať pro 5. sérii porovnávacích testů

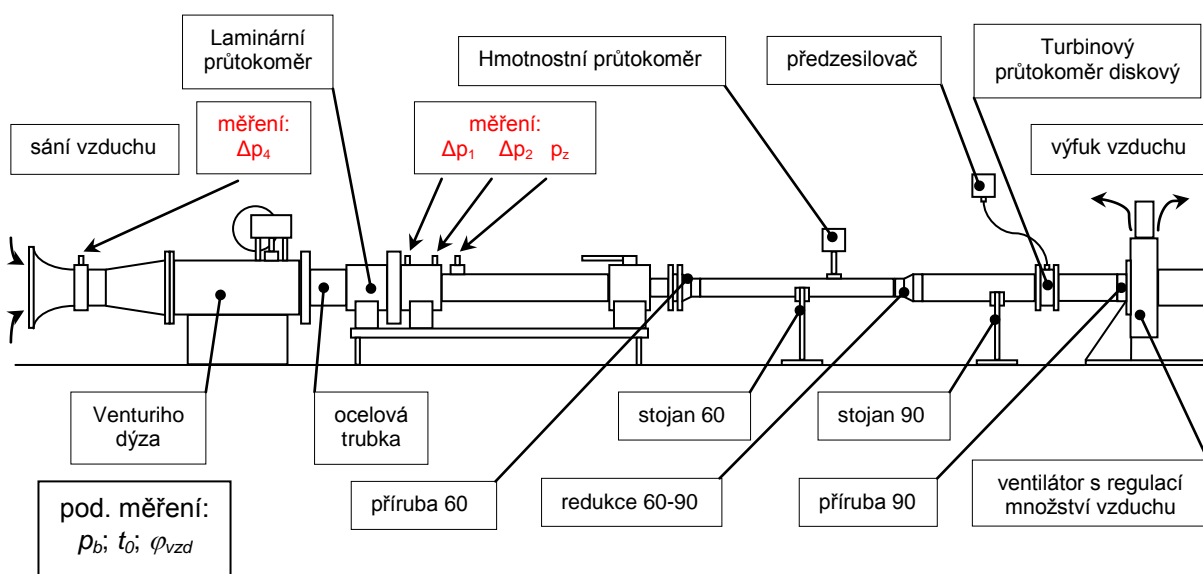
4.5.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Venturiho dýza (Larco)
- Laminární průtokoměr (50 MC 02-6F)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)
- Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)
- Ventilátor (Livent 12)



Odečítání naměřených hodnot z průtokoměrů bylo stejné jako v bodech 4.1.1. a 4.4.1. U laminárního průtokoměru bylo ještě přidáno měření tlakové ztráty (p_z) v uklidňujícím potrubí (obr. 36).

Obr. 35 vlevo: Měřicí trať pro 5. sérii porovnávacích testů.



Obr. 36: Schéma měřicí trati pro 5. sérii porovnávacích testů.

4.5.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu φ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
97,52	20,1	43,5	2337	287,1	1,164

Tab. 11: Atmosférické podmínky při 5. sérii měření.

4.5.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.5.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Naměřené hodnoty průtokoměrů byly upraveny jako v bodech 4.1.4. a 4.4.4.

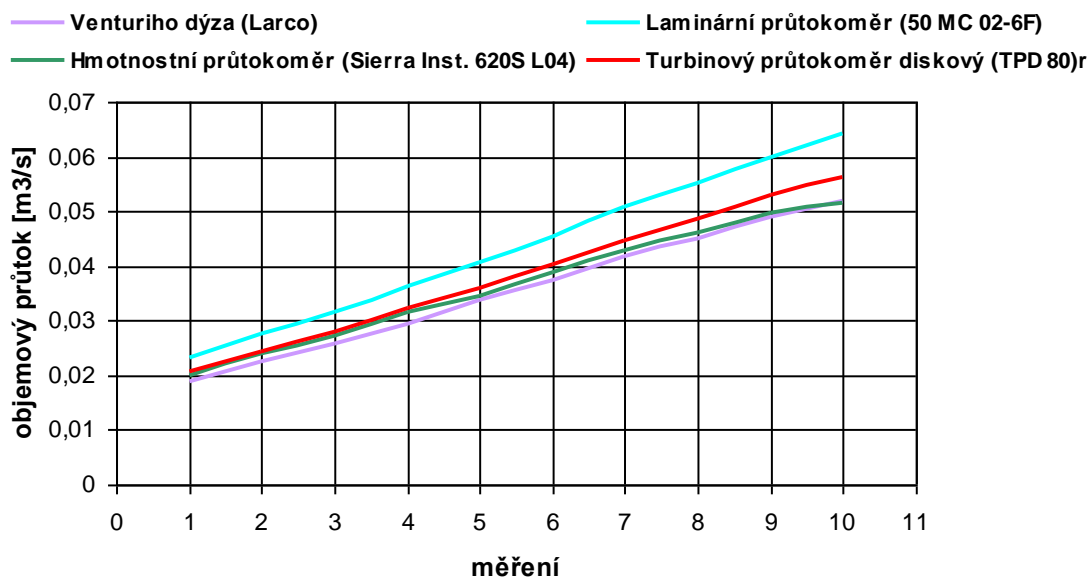
č. měření	Laminární průtokoměr (50 MC 02-6F)							
	měřeno			spočteno				
	rozdíl tlaku Δp_1 (Pa)	rozdíl tlaku Δp_2 (hPa)	tlaková ztráta p_z (hPa)	statický tlak za průtokoměrem $p_3 = p_b - p_z$ (Pa)	rozdíl tlaku $\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1$ (Pa)	rozdíl tlaku Δp (mmH ₂ O)	teoretický objemový průtok Q_T (m ³ /s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	6	1,3	1,34	97386	124	12,6	0,0258	0,0231
2	8,4	1,57	1,64	97356	148,6	15,2	0,0309	0,0276
3	10,7	1,81	1,89	97331	170,3	17,4	0,0354	0,0317
4	13,9	2,08	2,21	97299	194,1	19,8	0,0404	0,0361
5	17,3	2,36	2,5	97270	218,7	22,3	0,0455	0,0407
6	21,8	2,66	2,88	97232	244,2	24,9	0,0508	0,0454
7	27	3	3,28	97192	273	27,8	0,0568	0,0508
8	31,8	3,28	3,58	97162	296,2	30,2	0,0616	0,0551
9	38,5	3,6	3,99	97121	321,5	32,8	0,0669	0,0598
10	43,9	3,9	4,3	97090	346,1	35,3	0,0720	0,0643

Tab. 12: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (laminární průtokoměr).

č. měření	Venturiho dýza (dýza Larco)				Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)		Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)	
	měřeno rozdíl tlaku Δp_4 (Pa)	spočteno			měřeno teoretický objemový průtok Q_T (l/min)	spočteno skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)	měřeno skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /h)	spočteno skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
		rozdíl tlaku Δp_4 (mmH ₂ O)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /min)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)				
1	6,6	0,7	1,14	0,0190	1071	0,0199	74	0,0206
2	9,5	1,0	1,36	0,0227	1284	0,0239	88	0,0245
3	12,2	1,2	1,54	0,0257	1458	0,0271	101	0,0281
4	16,1	1,6	1,77	0,0295	1691	0,0314	116	0,0323
5	20,8	2,1	2,02	0,0337	1860	0,0346	129	0,0358
6	25,8	2,6	2,24	0,0373	2078	0,0386	145	0,0403
7	32,1	3,3	2,5	0,0417	2302	0,0428	161	0,0447
8	37,2	3,8	2,7	0,0450	2482	0,0461	175	0,0486
9	44,2	4,5	2,94	0,0490	2682	0,0499	191	0,0531
10	49,5	5,0	3,11	0,0518	2773	0,0516	203	0,0564

Tab. 13: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (Venturiho dýza, hmotnostní a turbinový průtokoměr diskový).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 6, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 6: Porovnání průtokoměrů vzduchu při páté sérii měření.

4.5.5. hodnocení

Turbinový průtokoměr se opět s vzrůstajícím průtokem rozchází s hmotnostním průtokoměrem, zato Venturiho dýza zůstává po celé délce s ním vesměs v kontaktu. Laminární průtokoměr ukazuje opět výrazně vyšší hodnoty.

4.6. Měřicí trať pro 6. sérii porovnávacích testů

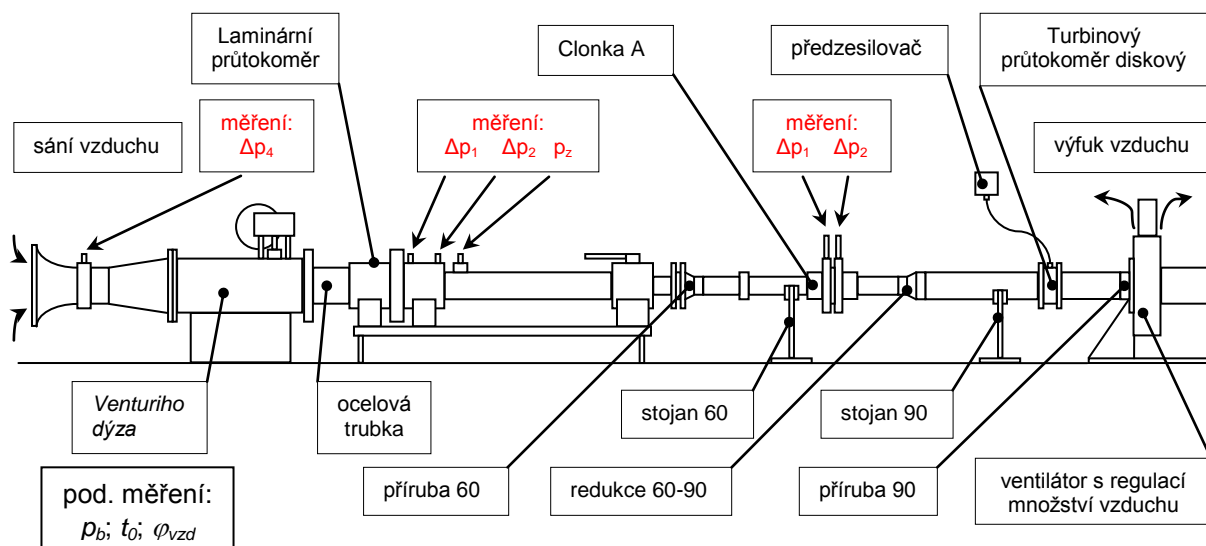
4.6.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Venturiho dýza (Larco)
- Laminární průtokoměr (50 MC 02-6F)
- Clonka A (s koutovými odběry)
- Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)
- Ventilátor (Livent 12)



Odečítání naměřených hodnot z průtokoměrů bylo stejné jako v bodech 4.1.1., 4.3.1, 4.4.1. a 4.5.1.

Obr. 37: Měřicí trať pro 6. sérii porovnávacích testů.



Obr. 38: Schéma měřicí tratě pro 6. sérii porovnávacích testů.

4.6.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu ϕ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
97,57	20,1	43,7	2337	287,1	1,164

Tab. 14: Atmosférické podmínky při 6. sérii měření.

4.6.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.6.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Naměřené hodnoty průtokoměrů byly upraveny jako v bodech 4.1.4, 4.3.4. a 4.4.4.

Clonka A (s koutovými odběry)		
poměr průměrů $\beta=d/D$ (-)	Reynoldsovo číslo Re_D (-)	součinitel průtoků C (-)
0,7034	7916,12	0,6435

Tab. 15: Tabulka vypočtených hodnot clonky A.

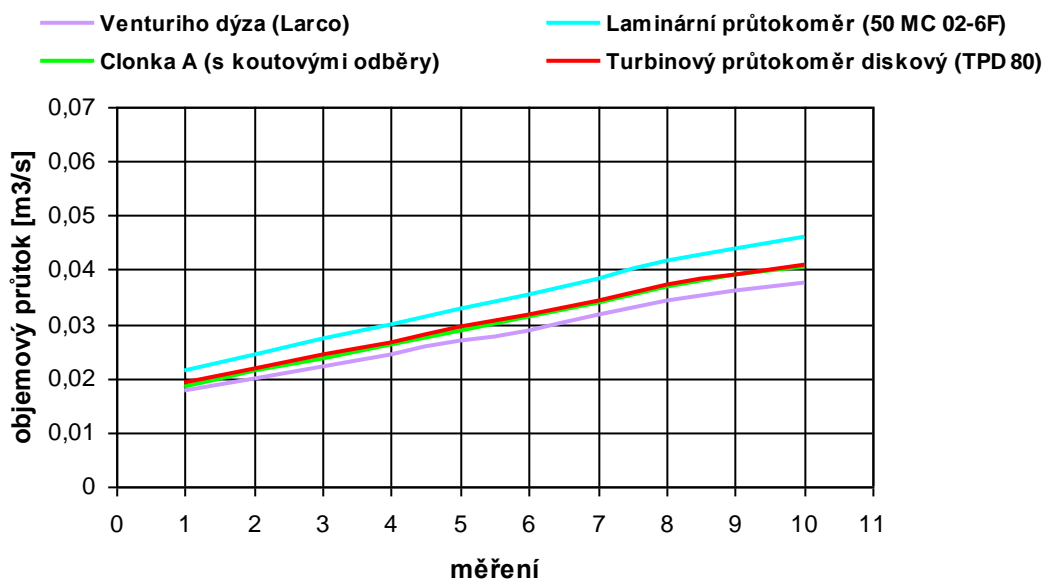
č. měření	Venturiho dýza (Larco)				Clonka A (s koutovými odběry)					
	měřeno	spočteno			měřeno		spočteno			
	rozdíl tlaku Δp_4 (Pa)	rozdíl tlaku Δp_4 (mmH ₂ O)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /min)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)	rozdíl tlaku Δp_1 (Pa)	rozdíl tlaku Δp_2 (hPa)	rozdíl tlaku $\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1$ (Pa)	součinitel expanze ε (-)	hmotnostní tok m_s (kg/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	5,8	0,6	1,06	0,0177	1,59	3,58	199	0,9993	0,0215	0,0185
2	7,3	0,7	1,19	0,0198	1,87	4,49	262	0,9990	0,0247	0,0212
3	9,1	0,9	1,33	0,0222	2,17	5,43	326	0,9988	0,0276	0,0237
4	11,1	1,1	1,47	0,0245	2,43	6,43	400	0,9985	0,0305	0,0262
5	13,3	1,4	1,61	0,0268	2,8	7,6	480	0,9983	0,0334	0,0287
6	15,4	1,6	1,73	0,0288	3,09	8,75	566	0,9979	0,0363	0,0312
7	18,5	1,9	1,9	0,0317	3,5	10,21	671	0,9976	0,0395	0,0340
8	21,5	2,2	2,05	0,0342	3,85	11,78	793	0,9971	0,0429	0,0369
9	24	2,4	2,16	0,0360	4,16	13,06	890	0,9968	0,0454	0,0390
10	26	2,7	2,25	0,0375	4,43	14,05	962	0,9965	0,0472	0,0406

Tab. 16: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (Venturiho dýza, clonka A).

č. měření	Laminární průtokoměr (50 MC 02-6F)								Turbinový průtokoměr diskový (TPD 80)	
	měřeno			spočteno					skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /h)	skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)
	rozdíl tlaku Δp_1 (Pa)	rozdíl tlaku Δp_2 (hPa)	tlaková ztráta p_z (hPa)	statický tlak za průtokoměrem $p_3=p_b-p_z$ (Pa)	rozdíl tlaku $\Delta p=\Delta p_2-$ Δp_1 (Pa)	rozdíl tlaku Δp (mmH ₂ O)	teoretický objemový průtok Q_T (m ³ /s)	skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)		
1	5,2	1,2	1,24	97446	114,8	11,7	0,0239	0,0214	69	0,0192
2	7	1,37	1,42	97428	130	13,3	0,0270	0,0242	78	0,0217
3	8	1,54	1,61	97409	146	14,9	0,0304	0,0272	87	0,0242
4	10,1	1,71	1,8	97390	160,9	16,4	0,0335	0,0300	96	0,0267
5	11,8	1,88	1,99	97371	176,2	18,0	0,0367	0,0328	106	0,0295
6	14	2,04	2,17	97353	190	19,4	0,0395	0,0354	114	0,0317
7	16,8	2,23	2,37	97333	206,2	21,0	0,0429	0,0384	124	0,0345
8	18,7	2,42	2,58	97312	223,3	22,8	0,0465	0,0416	134	0,0373
9	20,8	2,56	2,74	97296	235,2	24,0	0,0490	0,0438	141	0,0392
10	22,3	2,7	2,9	97280	247,7	25,3	0,0515	0,0461	147	0,0408

Tab. 17: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (laminární průtokoměr, turbinový průtokoměr diskový).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 7, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 7: Porovnání průtokoměrů vzduchu při šesté sérii měření.

4.6.5. Zhodnocení

Opět se potvrdily výsledky z předešlých měření. Turbinový průtokoměr diskový je totožný s clonkou A, Venturiho dýza se vzrůstajícím průtokem se jím vzdaluje a laminární průtokoměr ukazuje výrazně vyšší hodnoty.

4.7. Měřicí trať pro 7. sérii porovnávacích testů

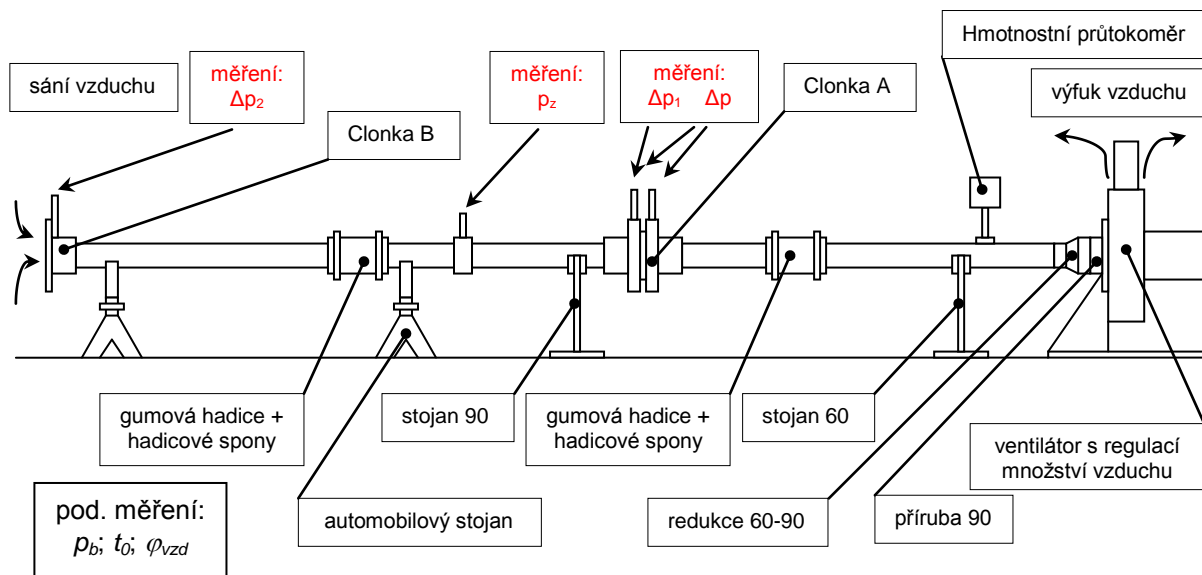
4.7.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Clonka B (čelní)
- Clonka A (s koutovými odběry)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)
- Ventilátor (Livent 12)



Odečítání naměřených hodnot z clonky B a hmotnostního průtokoměru se provedlo jako v bodě 4.2.1. U clonky A jsme tentokrát neměřili dva rozdíly tlaku před a za clonkou, ale pouze před clonkou Δp_1 . Δp_2 jsme nahradili měřením přímo rozdílu tlaků před a za clonkou Δp . V předním uklidňujícím potrubí clonky A byla ještě měřena tlaková ztráta (p_2), pro výpočet aktuální hustoty vzduchu před clonkou (obr. 40).

Obr. 39: Měřicí trať pro 7. sérii porovnávacích testů.



Obr. 40: Schéma měřicí trati pro 7. sérii porovnávacích testů.

4.7.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu ϕ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
97,2	17,2	63,2	1936	287,1	1,173

Tab. 18: Atmosférické podmínky při 7. sérii měření.

4.7.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.7.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Naměřené hodnoty průtokoměrů byly upraveny jako v bodech 4.2.4. a 4.3.4.

Clonka A (s koutovými odběry)		
poměr průměrů $\beta=d/D$ (-)	Reynoldsovo číslo Re_D (-)	součinitel průtoků C (-)
0,7034	7916,12	0,6435

Tab. 19: Tabulka vypočtených hodnot clonky A.

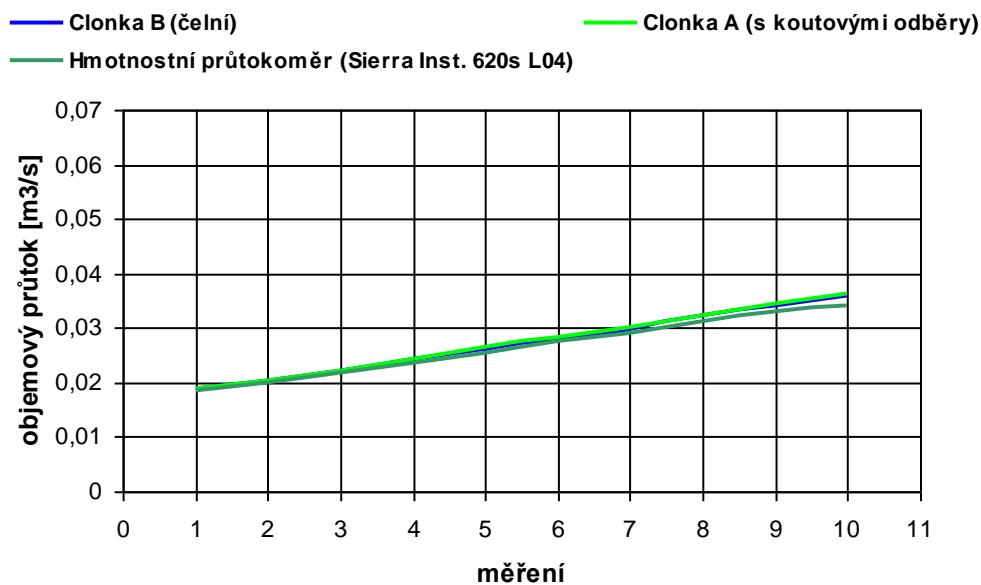
č. měření	Clonka A (s koutovými odběry)							
	měřeno			spočteno				
	tlaková ztráta p_z (hPa)	rozdíl tlaku Δp_1 (hPa)	rozdíl tlaku Δp (hPa)	statický tlak před clonkou $p_o=p_b-p_z$ (kPa)	hustota vzduchu před clonkou ρ_{vzd} (kg/m ³)	součinitel expanze ε (-)	hmotnostní tok m_s (kg/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	1,47	1,39	2,07	97,053	1,170	0,9992	0,0220	0,0188
2	1,71	1,57	2,41	97,029	1,170	0,9991	0,0238	0,0203
3	2,04	1,88	2,9	96,996	1,170	0,9989	0,0261	0,0223
4	2,46	2,29	3,47	96,954	1,169	0,9987	0,0285	0,0244
5	2,82	2,61	4,05	96,918	1,169	0,9985	0,0308	0,0263
6	3,23	2,88	4,63	96,877	1,168	0,9983	0,0323	0,0281
7	3,69	3,11	5,35	96,831	1,168	0,9980	0,0353	0,0303
8	4,25	3,27	6,09	96,775	1,167	0,9978	0,0377	0,0323
9	4,81	3,54	7	96,719	1,166	0,9974	0,0404	0,0346
10	5,26	3,81	7,65	96,674	1,166	0,9972	0,0422	0,0362

Tab. 20: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (clonka A).

č. měření	Clonka B (čelní)			Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)	
	měřeno rozdíl tlaku Δp_2 (mBar)	spočteno		měřeno teoretický objemový průtok Q_T (l/min)	spočteno skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)
		skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /h)	skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)		
1	2,14	67,90	0,0189	992	0,0183
2	2,5	73,38	0,0204	1082	0,0200
3	2,99	80,25	0,0223	1181	0,0218
4	3,57	87,66	0,0244	1285	0,0237
5	4,12	94,18	0,0262	1380	0,0255
6	4,71	100,68	0,0280	1484	0,0274
7	5,39	107,69	0,0299	1578	0,0291
8	6,3	116,41	0,0323	1682	0,0311
9	7,03	122,95	0,0342	1787	0,0330
10	7,78	129,33	0,0359	1852	0,0342

Tab. 21: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (clonka B, hmotnostní průtokoměr).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 8, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 8: Porovnání průtokoměrů vzduchu při sedmé sérii měření

4.7.5. Zhodnocení

Graf ukazuje vyrovnanost všech tří průtokoměrů, pouze hmotnostní průtokoměr opět v druhé půli měření zobrazuje o trochu nižší průtok.

4.8. Měřicí trať pro 8. sérii porovnávacích testů

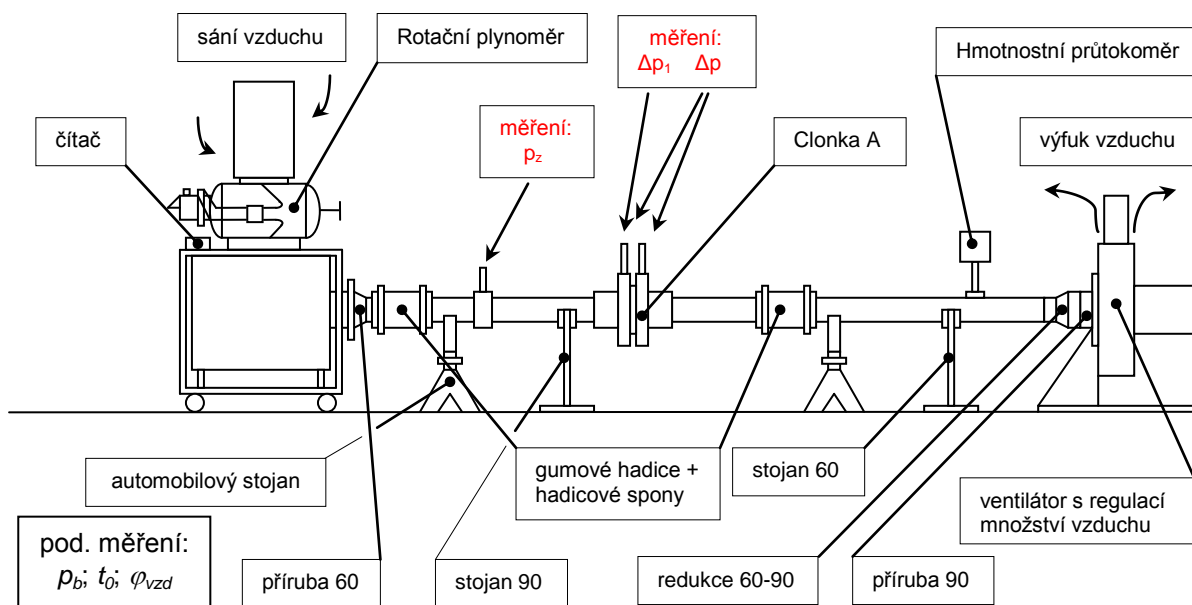
4.8.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Rotační plynoměr (Gaselan GZDA DN 150)
- Clonka A (s koutovými odběry)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)
- Ventilátor (Livent 12)



Z rotačního plynoměru vyčteme aktuální průtok na displeji čítače k němu připojeném. U zbylých dvou průtokoměrů postupujeme při odečítání hodnot stejně jako v bodě 4.7.1.

Obr. 41 vlevo: Měřicí trať pro 8. sérii porovnávacích testů.



Obr. 42: Schéma měřicí tratě pro 8. sérii porovnávacích testů.

4.8.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu ϕ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
96,07	17,1	66,7	1936	287,1	1,161

Tab. 22: Atmosférické podmínky při 8. sérii měření.

4.8.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.8.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Rotační plynoměr:

Naměřené hodnoty přepočteme na metry krychlové za sekundu.

Hodnoty clonky A a hmotnostního průtokoměru byly upraveny jako v bodě 4.3.4.

Clonka A (s koutovými odběry)		
poměr průměrů $\beta=d/D$ (-)	Reynoldsovo číslo Re_D (-)	součinitel průtoku C (-)
0,7034	7916,12	0,6435

Tab. 23: Tabulka vypočtených hodnot clonky A.

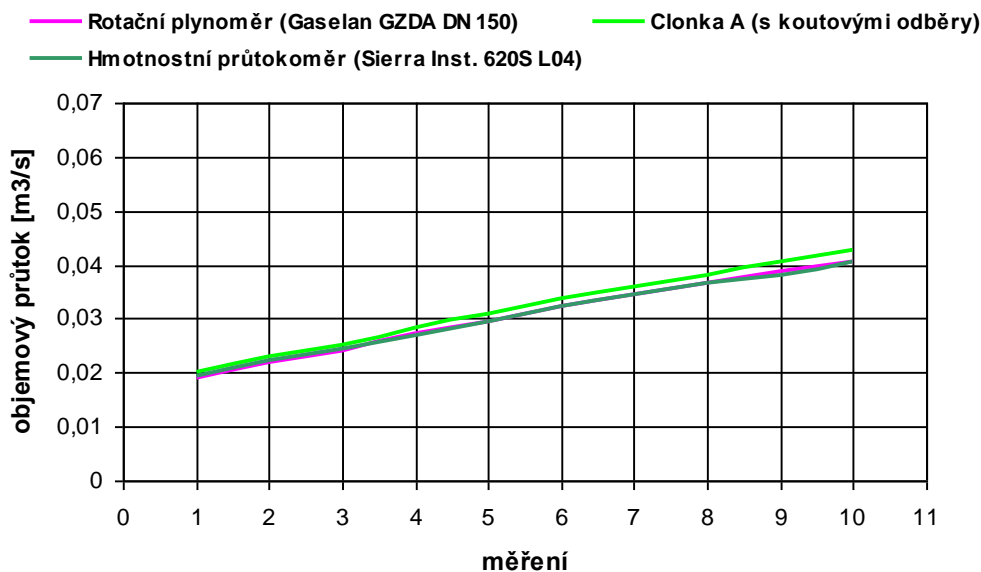
č. měření	Clonka A (s koutovými odběry)							
	měřeno			spočteno				
	tlaková ztráta p_z (hPa)	rozdíl tlaku Δp_1 (hPa)	rozdíl tlaku Δp (hPa)	statický tlak před clonkou $p_0=p_b-p_z$ (kPa)	hustota vzduchu před clonkou ρ_{vzd} (kg/m ³)	součinitel expanze ε (-)	hmotnostní tok m_s (kg/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	0,855	0,832	2,33	95,9845	1,158	0,9991	0,0232	0,0201
2	1,04	1,01	3,04	95,966	1,158	0,9989	0,0265	0,0229
3	1,21	1,16	3,67	95,949	1,158	0,9986	0,0292	0,0252
4	1,47	1,41	4,63	95,923	1,158	0,9983	0,0327	0,0283
5	1,69	1,56	5,5	95,901	1,157	0,9980	0,0357	0,0308
6	1,92	1,82	6,61	95,878	1,157	0,9976	0,0391	0,0338
7	2,2	2,04	7,52	95,85	1,157	0,9972	0,0417	0,0360
8	2,39	2,22	8,47	95,831	1,156	0,9969	0,0442	0,0382
9	2,65	2,53	9,47	95,805	1,156	0,9965	0,0467	0,0404
10	2,9	2,72	10,6	95,78	1,156	0,9961	0,0494	0,0427

Tab. 24: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (clonka A).

č. měření	Rotační plynoměr (Gaselan GZDA DN 150)		Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L04)	
	měřeno	spočteno	měřeno	spočteno
	skutečný objemový průtok Q_S (l/min)	skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)	teoretický objemový průtok Q_T (l/min)	skutečný objemový průtok Q_S (m ³ /s)
1	1135	0,0189	1035	0,0193
2	1314	0,0219	1192	0,0223
3	1452	0,0242	1301	0,0243
4	1632	0,0272	1432	0,0267
5	1763	0,0294	1582	0,0296
6	1932	0,0322	1722	0,0322
7	2072	0,0345	1841	0,0344
8	2198	0,0366	1952	0,0365
9	2320	0,0387	2042	0,0382
10	2441	0,0407	2171	0,0406

Tab. 25: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (rotační plynoměr, hmotnostní průtokoměr).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 9, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 9: Porovnání průtokoměrů vzduchu při osmé sérii měření.

4.8.5. Zhodnocení

Rotační plynoměr přesně kopíruje objemový průtok hmotnostního průtokoměru, clonka A se po celé délce, jako v minulých měřeních, mírně odchyluje od hmotnostního průtokoměru. Uvidíme, jak si v další trati povede druhý typ z hmotnostních průtokoměrů.

4.9. Měřicí trať pro 9. sérii porovnávacích testů

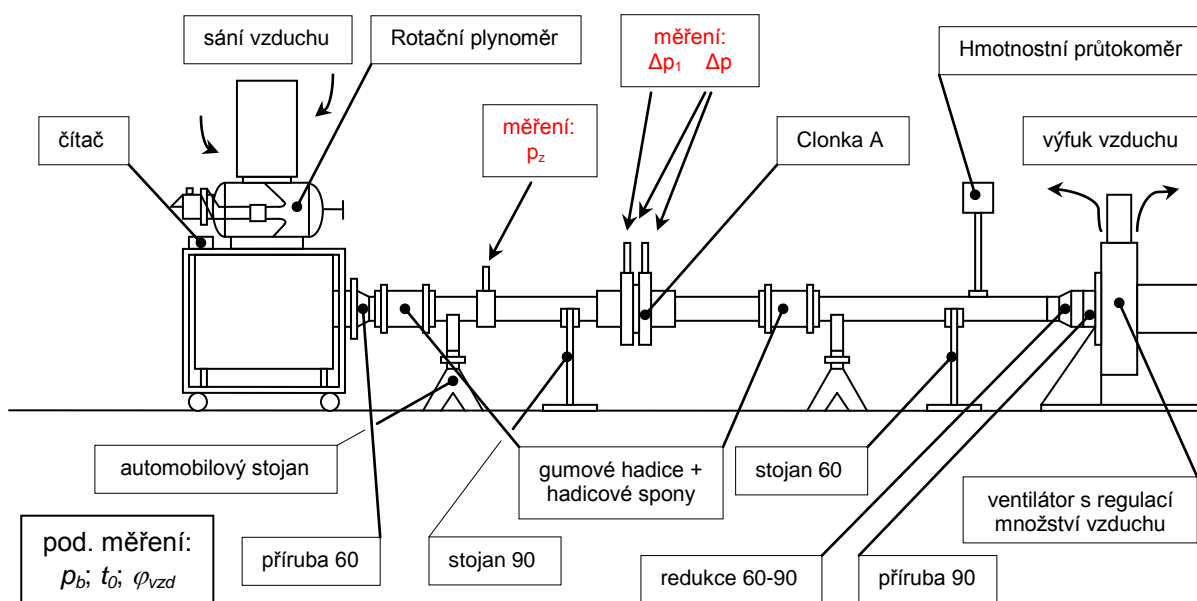
4.9.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Rotační plynoměr (Gaselan GZDA DN 150)
- Clonka A (s koutovými odběry)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13)
- Ventilátor (Livent 12)



Odečítání naměřených hodnot z průtokoměrů bylo stejné jako v bodech 4.7.1. a 4.8.1.

Obr. 43 vlevo: Měřicí trať pro 9. sérii porovnávacích testů.



Obr. 44: Schéma měřicí tratě pro 9. sérii porovnávacích testů.

4.9.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu ϕ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
95,92	18,4	66,5	2063	287,1	1,154

Tab. 26: Atmosférické podmínky při 9. sérii měření.

4.9.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.9.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Hmotnostní průtokoměr:

Naměřené hodnoty střední rychlosti proudění jsou dosazeny do vztahu pro výpočet aktuálního objemového průtoku za normálových (skutečných) podmínek:

$$\text{skutečný objemový průtok: } Q_s = \left(\frac{S_1}{k_P} \right) \cdot v_s \cdot \left(\frac{p_n}{p_b} \right) \cdot \frac{(273 + t_o)}{273} \quad (44)$$

Hodnoty rotačního plynoměru a clonky A byly upraveny jako v bodech 4.3.4. a 4.8.4.

Clonka A (s koutovými odběry)			Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13)	
poměr průměrů $\beta=d/D$ (-)	Reynoldsovo číslo Re_D (-)	součinitel průtoku C (-)	průřez potrubí S_1 (m ²)	koeficient proudění k_P
0,7034	7916,12	0,6435	0,002463	1,17

Tab. 27: Tabulka vypočtených hodnot (clonka A, hmotnostní průtokoměr).

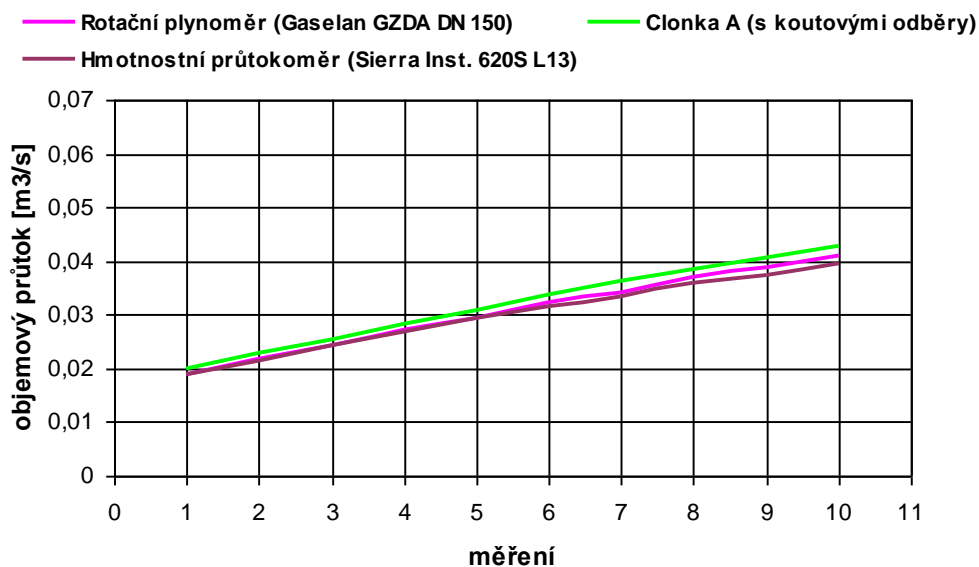
č. měření	Clonka A (s koutovými odběry)							
	měřeno			spočteno				
	tlaková ztráta p_z (hPa)	rozdíl tlaku Δp_1 (hPa)	rozdíl tlaku Δp (hPa)	statický tlak před clonkou $p_0=p_b-p_z$ (kPa)	hustota vzduchu před clonkou ρ_{vzd} (kg/m ³)	součinitel expanze ε (-)	hmotnostní tok m_s (kg/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	0,855	0,832	2,33	95,835	1,152	0,9991	0,0232	0,0201
2	1,04	1,01	3,04	95,816	1,152	0,9989	0,0265	0,0230
3	1,21	1,16	3,67	95,799	1,151	0,9986	0,0291	0,0253
4	1,47	1,41	4,63	95,773	1,151	0,9983	0,0326	0,0284
5	1,69	1,56	5,5	95,751	1,151	0,9980	0,0356	0,0309
6	1,92	1,82	6,61	95,728	1,150	0,9976	0,0390	0,0339
7	2,2	2,04	7,52	95,7	1,150	0,9972	0,0415	0,0362
8	2,39	2,22	8,47	95,681	1,150	0,9968	0,0441	0,0383
9	2,65	2,53	9,47	95,655	1,150	0,9965	0,0466	0,0405
10	2,9	2,72	10,6	95,63	1,149	0,9960	0,0492	0,0428

Tab. 28: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (clonka A).

č. měření	Rotační plynoměr (Gaselan GZDA DN 150)		Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13)	
	měřeno	spočteno	měřeno	spočteno
	skutečný objemový průtok Q_s (l/min)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)	střední rychlost proudění v_s (m/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	1140	0,0190	7,95	0,0189
2	1305	0,0218	9,08	0,0216
3	1463	0,0244	10,25	0,0243
4	1631	0,0272	11,32	0,0269
5	1758	0,0293	12,31	0,0292
6	1929	0,0322	13,25	0,0314
7	2053	0,0342	14,08	0,0334
8	2212	0,0369	15,2	0,0361
9	2320	0,0387	15,75	0,0374
10	2449	0,0408	16,63	0,0395

Tab. 29: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (rotační plynoměr, hmotnostní průtokoměr).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 10, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 10: Porovnání průtokoměrů vzduchu při deváté sérii měření.

4.9.5. Zhodnocení

Výsledné hodnoty průtoku hmotnostního průtokoměru typu L13, v porovnání s rotačním plynoměrem, ukazují shodnost měření s hmotnostním průtokoměrem typu L04. Clonka B se od obou průtokoměrů opět mírně odchyluje.

4.10. Měřicí trať pro 10. sérii porovnávacích testů

V této poslední sérii měření byl vyzkoušen vliv správného natočení hmotnostního průtokoměru (Sierra Inst. 620S L13) a jeho žhaveného drátku v měřicím (uklidňovacím) potrubí, na hodnotu aktuálního objemového průtoku.

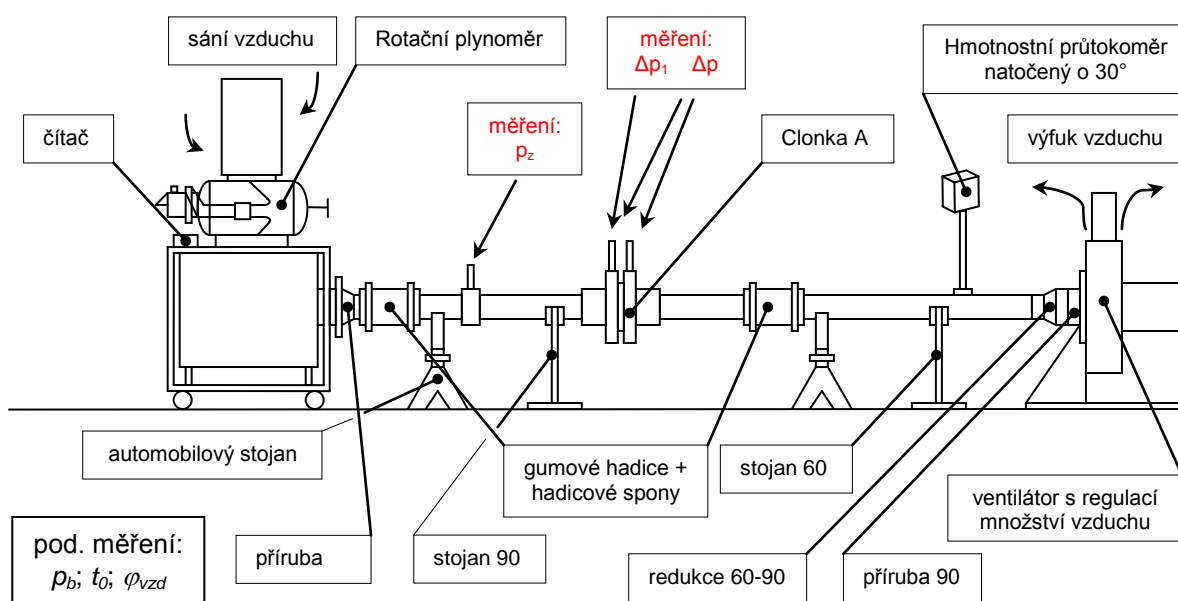
4.10.1. Měřicí trať tvoří průtokoměry:

- Rotační plynoměr (Gaselan GZDA DN 150)
- Clonka A (s koutovými odběry)
- Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13) natočený o 30°
- Ventilátor (Livent 12)



Odečítání naměřených hodnot z průtokoměrů bylo stejné jako v bodech 4.7.1 a 4.8.1.

Obr. 45: Měřicí trať pro 10. sérii porovnávacích testů (na obrázku vidět natočení hmotnostního průtokoměru).



Obr. 46: Schéma měřicí trati pro 10. sérii porovnávacích testů.

4.10.2. Atmosférické podmínky při měření

proměnné hodnoty				neměnná hodnota	spočtená hodnota
barometrický tlak p_b (kPa)	teplota vzduchu t_o (°C)	vlhkost vzduchu ϕ_{vzd} (%)	parciální tlak nasycených par vody p_{parc} (Pa)	měrná plynová konst. vzduchu r_{vzd} (J/kg.K)	hustota vzduchu ρ_{vzd} (kg/m ³)
95,92	18,4	66,5	2063	287,1	1,154

Tab. 30: Atmosférické podmínky při 10. sérii měření.

4.10.3. Průběh měření: prakticky shodný s měřením v 1. sérii (bod 4.1.3.).

4.10.4. Výpočty průtoků a výsledek měření

Naměřené hodnoty průtokoměrů byly upraveny jako v bodech 4.3.4., 4.8.4. a 4.9.4.

Clonka A (s koutovými odběry)			Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13)	
poměr průměrů $\beta=d/D$ (-)	Reynoldsovo číslo Re_D (-)	součinitel průtoku C (-)	průřez potrubí S_1 (m ²)	koeficient proudění k_P
0,7034	7916,12	0,6435	0,002463	1,17

Tab. 31: Tabulka vypočtených hodnot (clonka A, hmotnostní průtokoměr).

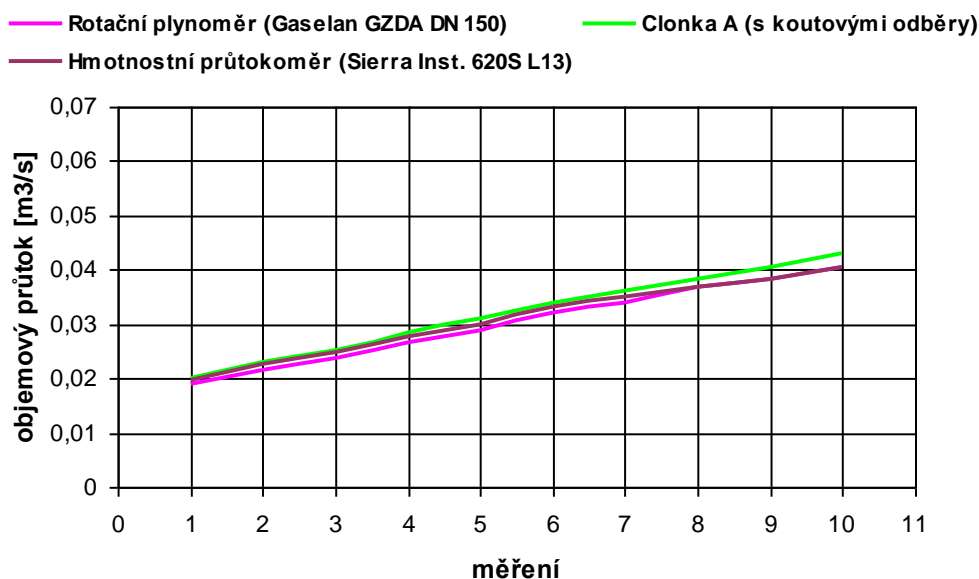
č. měření	Clonka A (s koutovými odběry)							
	měřeno			spočteno				
	tlaková ztráta p_z (hPa)	rozdílná tlaku Δp_1 (hPa)	rozdílná tlaku Δp (hPa)	statický tlak před clonkou $p_0=p_b-p_z$ (kPa)	hustota vzduchu před clonkou ρ_{vzd} (kg/m ³)	součinitel expanze ε (-)	hmotnostní tok m_s (kg/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	0,855	0,832	2,33	95,8345	1,152	0,9991	0,0232	0,0201
2	1,04	1,01	3,04	95,816	1,152	0,9989	0,0265	0,0230
3	1,21	1,16	3,67	95,799	1,151	0,9986	0,0291	0,0253
4	1,47	1,41	4,63	95,773	1,151	0,9983	0,0326	0,0284
5	1,69	1,56	5,5	95,751	1,151	0,9980	0,0356	0,0309
6	1,92	1,82	6,61	95,728	1,150	0,9976	0,0390	0,0339
7	2,2	2,04	7,52	95,7	1,150	0,9972	0,0415	0,0361
8	2,39	2,22	8,47	95,681	1,150	0,9969	0,0441	0,0383
9	2,65	2,53	9,47	95,655	1,150	0,9965	0,0466	0,0405
10	2,9	2,72	10,6	95,63	1,149	0,9961	0,0492	0,0428

Tab. 32: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (clonka A).

č. měření	Rotační plynoměr (Gaselan GZDA DN 150)		Hmotnostní průtokoměr (Sierra Inst. 620S L13) natočený o 30°	
	měřeno	spočteno	měřeno	spočteno
	skutečný objemový průtok Q_s (l/min)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)	střední rychlost proudění v_s (m/s)	skutečný objemový průtok Q_s (m ³ /s)
1	1138	0,0190	8,31	0,0197
2	1299	0,0217	9,45	0,0224
3	1430	0,0238	10,44	0,0248
4	1602	0,0267	11,62	0,0276
5	1734	0,0289	12,52	0,0297
6	1932	0,0322	14,01	0,0333
7	2044	0,0341	14,72	0,0349
8	2205	0,0368	15,44	0,0366
9	2292	0,0382	16,2	0,0385
10	2427	0,0405	17,01	0,0404

Tab. 33: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (rotační plynoměr, hmotnostní průtokoměr).

Výsledné objemové průtoky jsou vyneseny do grafu 11, kde jsou vzájemně porovnány.



Graf 11: Porovnání průtokoměrů vzduchu při desáté sérii měření.

4.10.5. Zhodnocení

V porovnání s devátou sérií měření se natočením hmotnostního průtokoměru docílilo mírného zvýšení udávaného aktuálního objemového průtoku. Toto navýšení lze považovat za minimální a proto případná nepřesnost natočení hmotnostního průtokoměru je zanedbatelná.

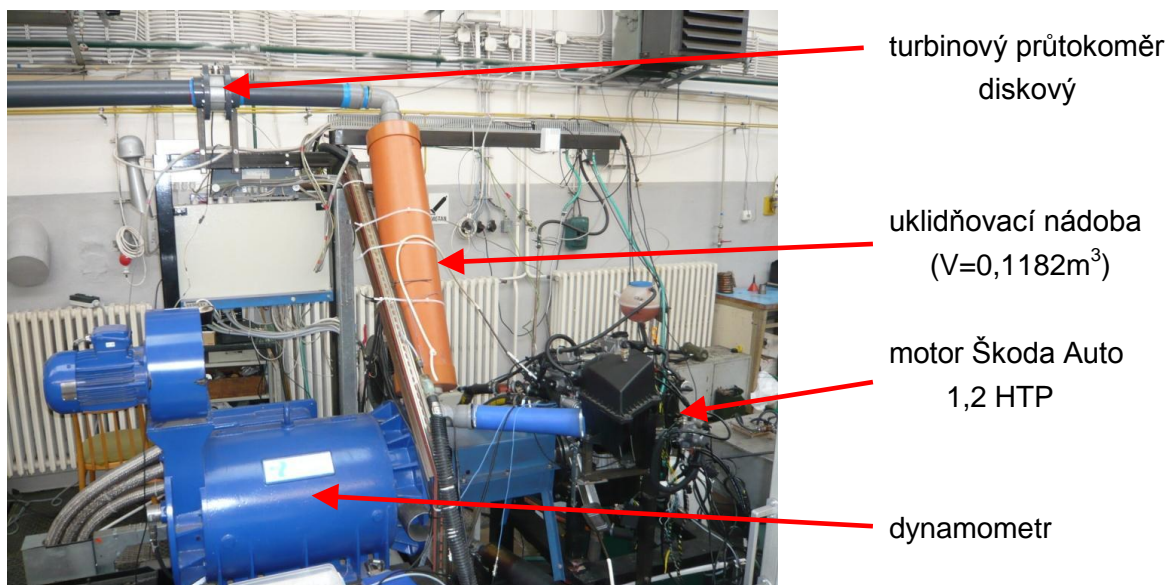
4.11. Celkové zhodnocení přesnosti průtokoměrů při ustáleném proudění vzduchu

Po shlédnutí všech deseti sérií měření a vzájemném porovnání vycházejí shodně jako nejpřesnější měřidla Venturiho dýza, rotační plynoměr a oba dva hmotnostní průtokoměry. Se 4–10% vyšším objemovým průtokem se vyznačuje turbinový průtokoměr diskový, clonka A a clonka B. Jako nejméně přesný se ukázal laminární průtokoměr se 14–20% chybou - příčinou tohoto stavu bude pravděpodobně záměna dokumentace dodané k průtokoměru (průtokoměr byl získán zprostředkovaně z jiné zkušebny motorů a dokumentace k němu nemá jasnou identifikaci).

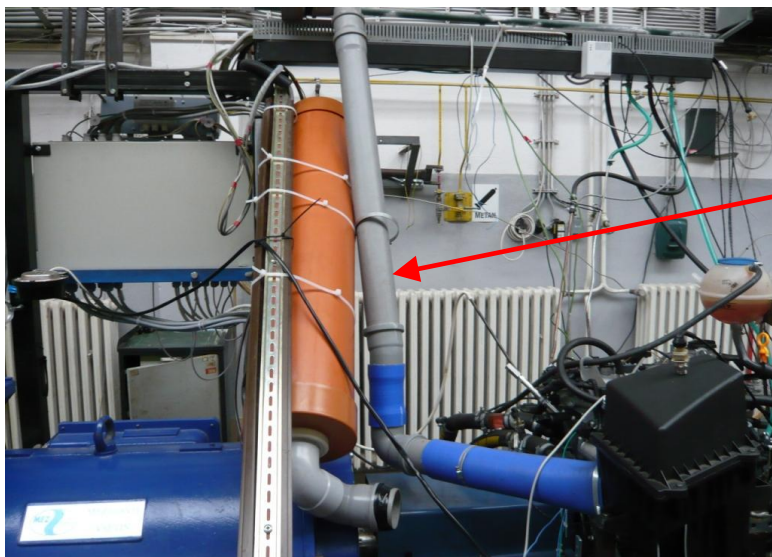
Provedená porovnávací měření několika typů průtokoměrů vzduchu používaných v laboratoři KVM ukázala na důležitost takovýchto měření pro zajištění správnosti výsledků měření významné veličiny při výzkumu na pístových spalovacích motorech.

5. Porovnávací zkoušky průtokoměru na motoru

Měření spotřeby atmosférického vzduchu v pístových spalovacích motorech se od provedených měření na měřicí trati s ustáleným průtokem vzduchu odlišuje. Vlivem objemového způsobu práce pístového spalovacího motoru je průtok vzduchu do motoru (a tím i průtok vzduchu průtokoměrem) neustálený, a tato skutečnost se projeví na výsledku měření. Pro dosažení správného výsledku se proto měřicí trať s průtokoměrem vzduchu doplňuje vyrovnávací nádobou o určitém objemu před průtokoměrem, ve které dojde k uklidnění a potřebnému ustálení průtoku vzduchu přes průtokoměr. V rámci bakalářské práce byla vyhodnocena měření průtoku vzduchu do motoru, provedená na zkušebním stanovišti se zážehovým motorem ŠA 1,2 HTP s různým uspořádáním měřicí tratě podle obr. 47 a obr. 48. Měření byla provedena v režimech vnější otáčkové charakteristiky (VOCH).



Obr. 47: Měření na motoru Škoda Auto 1,2 HTP s uklidňovací nádobou.



pouze spojovací potrubí
($V=0,0174\text{m}^3$)

Obr. 48: Měření na motoru Škoda Auto 1,2 HTP bez uklidňovací nádoby.

Uspořádání měřicí tratě pro měření průtoku vzduchu do motoru na zkušebním stanovišti v laboratoři závisí na typu motoru, který je na stanovišti instalován. Pro nepřepřlňované motory musí mít měřicí trať před průtokoměrem dostatečně velký objem, aby došlo k uklidnění vzduchu. U přeplňovaných motorů se většinou do měřicí tratě před průtokoměr nedává uklidňovací objem, neboť k uklidnění vzduchu před průtokoměrem pro měření spotřeby vzduchu v motoru dochází vlivem objemu stlačeného vzduchu v chladiči plicního vzduchu a objemu v plicním potrubí, k uklidnění průtoku vzduchu před průtokoměrem přispívá i plicní dmychadlo.

5.1. Výsledek měření a přepočet na dopravní účinnost motoru

Přesný výpočet zdvihového objemu motoru:

$$V_{Z/M} = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} \cdot z_p \cdot i_v \quad (45)$$

Dosadíme do vztahu pro teoretický objemový průtok vzduchu do motoru.

$$Q_T = V_{Z/M} \cdot \frac{n}{2 \cdot 60} \quad (46)$$

Dopravní účinnost získáme dělením skutečného objemového průtoku vzduchu do motoru teoretickým objemovým průtokem.

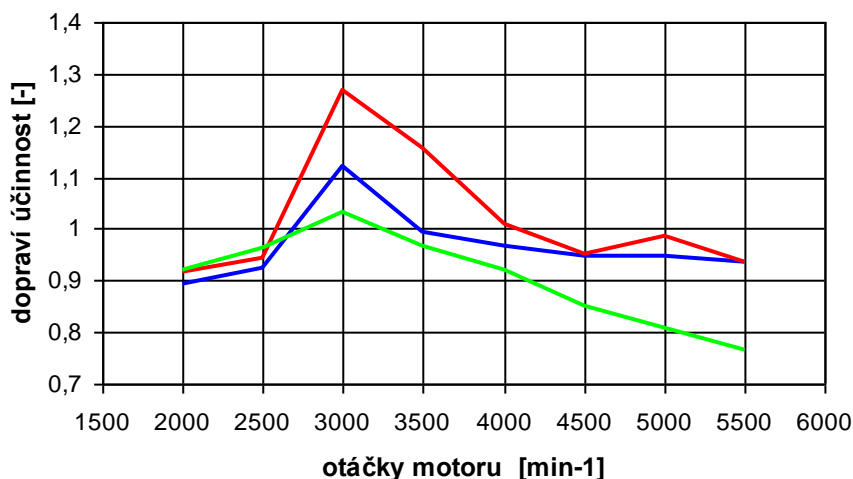
$$\eta_v = \frac{Q_s}{Q_T} \quad (47)$$

otáčky motoru n (1/min)	údaje Škoda Auto	VOCH s ukladňovací nádobou (měřeno turbinovým průt. diskovým)				VOCH bez ukladňovací nádoby (měřeno turbinovým průt. diskovým)			
		měřeno	spočteno			měřeno	spočteno		
	dopravní účinnost $\eta_v (-)$	skutečný objemový průtok vzduchu do motoru $Q_S (m^3/h)$	skutečný objemový průtok vzduchu do motoru $Q_S (m^3/s)$	teoretický objemový průtok vzduchu do motoru $Q_{teor} (m^3/s)$	dopravní účinnost $\eta_v (-)$	skutečný objemový průtok vzduchu do motoru $Q_S (m^3/h)$	skutečný objemový průtok vzduchu do motoru $Q_S (m^3/s)$	teoretický objemový průtok vzduchu do motoru $Q_{teor} (m^3/s)$	dopravní účinnost $\eta_v (-)$
2000	0,9216	64,5	0,0179	0,0200	0,8950	66	0,0183	0,0200	0,9150
2500	0,9630	83	0,0231	0,0250	0,9240	85	0,0236	0,0250	0,9440
3000	1,0325	121	0,0336	0,0300	1,1200	111	0,0308	0,0300	1,2667
3500	0,9682	125	0,0347	0,0349	0,9943	147	0,0408	0,0349	1,1547
4000	0,9189	139	0,0386	0,0399	0,9674	145	0,0403	0,0399	1,0100
4500	0,8497	153	0,0425	0,0449	0,9465	154	0,0428	0,0449	0,9532
5000	0,8101	170	0,0472	0,0499	0,9459	177	0,0492	0,0499	0,9860
5500	0,7656	185	0,0514	0,0549	0,9362	185	0,0514	0,0549	0,9362

Tab. 34: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (měření turbinovým průtokoměrem diskovým s ukladňovací nádobou a bez ukladňovací nádoby v režimech VOCH) + údaje firmy Škoda Auto.

Výsledné spočtené dopravní účinnosti motoru s ukladňovací nádobou a bez ukladňovací nádoby byly porovnány s údaji dodanými firmou Škoda Auto (graf 12).

- měření s ukladňovací nádobou VOCH motoru (turbinový průtokoměr diskový)
- měření bez ukladňovací nádoby VOCH motoru (turbinový průtokoměr diskový)
- údaje firmy Škoda Auto



Graf 12: Závislost dopravní (objemové) účinnosti na otáčkách motoru (podle údajů měřiče průtoku plynů turbinového průtokoměru diskového).

5.2. Zhodnocení

Z grafu vyplývá, že použitím vyrovnávací (uklidňovací) nádoby mezi průtokoměrem a motorem ukazuje průtokoměr nižší hodnoty průtoku vzduchu než při měření bez uklidňovací nádoby. V porovnání s hodnotami udávanými firmou Škoda Auto je přesto výsledek měření výrazně odlišný. Pro dosažení správného výsledku musí být měřicí trať pro průtok nasávaného vzduchu do motoru i použitý průtokoměr voleny vhodněji než je současné uspořádání na zkušebním stanovišti.

6. Závěr

Bakalářská práce vysvětluje v úvodních odstavcích význam měření spotřeby vzduchu v motoru. V další části popisuje jednotlivé principy měření pomocí různých průtokoměrů vzduchu používaných v laboratoři KVM. Pro zjištění přesnosti jednotlivých průtokoměrů se zabývá jejich vzájemným porovnáním při měření v měřicí trati. V poslední části ukazuje na problém potřebné zástavby průtokoměru vzduchu v sání motoru, kde ukazuje důležitost použití uklidňovací nádoby mezi motorem a průtokoměrem pro zajištění přesného měření. Materiály z bakalářské práce lze využít v další výzkumné práci v laboratoři KVM k hledání optimálního uspořádání měření průtoku vzduchu do motoru na zkušebních stanovištích.

Seznam použité literatury a softwaru

Literatura:

- [1] Beroun, Stanislav: Vozidlové motory, TUL v Liberci, Studijní texty k předmětu „Motorová vozidla“.
- [2] Trnka, Jaroslav; Urban, Jaroslav: Spařovací motory, 1. vydání, nakl. Alfa 1992.
- [3] Křourek, Jiří; Lauerová, Marie; Klas, Jan: Dokumentace k Turbinovému průtokoměru diskovému (Měřič průtoku plynů MPP 101, Předzesilovač PZ 11), 1996.
- [4] Sierra Instruments: Příručka k Hmotnostnímu průtokoměru řady 620S Fast-Flo.
- [5] Pospíšil, Miroslav; Teysslerová, Marcela: Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku ČSN ISO 5167-1. Přepřacované vydání r. 1993, EKSTEP Praha, 1999.
- [6] Pracovní materiály poskytnuté KVM, TU Liberec.
- [7] Meriam Instrument: Příručka k Laminárnímu průtokoměru typu 50 MC 02-6F, 2001.
- [8] Urbášek, Jan: Teoretické základy energetických zařízení, 1. vydání, VŠST Liberec 1985.
- [9] <http://pub.danrimal.net/puntoMk1/nasavani.htm>
- [10] http://www.autoakademie.cz/DOWNLOAD/ORJ_KATALOG.pdf
- [11] <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k4592>
- [12] <http://www.aerzen.cz/CZ/Homepage/Vyrobky/Rotacni-plynomery-Aerzen/Vseobecne-informace>

Software:

Microsoft office
Catia V5R16

Seznam příloh

Kalibrační list:

Kalibrační list rotačního plynoměru (GZDA DN 150)

Výkresová dokumentace:

Součástí této práce je výkresová dokumentace přírub a redukci použitých v měřících tratích.

KVM-BP-001.....	Příruba_60
KVM-BP-002.....	Redukce_60-90
KVM-BP-003.....	Příruba_90